



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

DETEKCE NÁNOSU UV LEPIDLA

UV ADHESIVE COATING DETECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Pavelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Honec, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Radek Pavelka

ID: 144910

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Detekce nánosu UV lepidla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit pracoviště pro automatickou kontrolu parametrů nanášeného UV lepidla na části výrobku za pomoci průmyslových kamer Baumer.

1. Proveďte rešerši používaných metod a dostupného vybavení.
2. Navrhněte pracoviště pro snímání a vyhodnocení dat s ohledem na UV marker obsažený v lepidle.
3. Navrhněte a implementujte vhodnou metodu detekce parametrů lepidla.
4. Vytvořte obslužnou aplikaci s ohledem na zpětnou vazbu na dávkovací stroj a provoz v reálném čase.
5. Otestujte a zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

HLAVAC V., SONKA M., BOYLE R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, ISBN 978-0495082521

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 14.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Peter Honec, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje návrhu kontrolního kamerového systému pro detekci vad při nanášení UV luminiscenčního lepidla, spojujícího dno papírového pytle. Během práce byl vytvořen a otestován program pracující s průmyslovou kamerou Baumer VCXG-53C, implementující dvě kontrolní metody - vyhledání uživatelem předem definované šablony lepidla pomocí vzájemné 2D korelace a měření plochy lepidla z binárně segmentovaného obrazu. Výsledkem práce je navržený kontrolní systém, který je připravený k nasazení ve zvolené zákaznické aplikaci.

KLÍČOVÁ SLOVA

kamerová kontrola, průmyslové kamery, vyhledání vzoru v obraze, vzájemná 2D korelace, UV luminiscence, C#, GiGE Vision, GenICam, OpenCV, EmguCV

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on a design of camera control system used for detecting defects, appearing during a UV luminescent glue application on the bottom of a paper bag. As a part of this thesis, an application was developed, using Baumer VCXG-53C industrial camera, implementing two different control methods - 2D cross correlation image pattern matching based on previously user defined pattern and glue area size measuring based on binary segmented image. The result of this work is a fully developed control system, prepared to be put into operation at the customer's production line.

KEYWORDS

camera control system, industrial cameras, pattern matching, 2D cross-correlation, UV luminiscence, C#, GiGE Vision, GenICam, OpenCV, EmguCV

PAVELKA, Radek. *Detekce nánosu UV lepidla*. Brno, Rok, 67 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Peter Honec, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Detekce nánosů UV lepidla“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Peteru Honecovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	11
I Rešerše používaných metod a dostupného vybavení	12
1 Lepidla a jejich vlastnosti	13
1.1 Podstata lepícího procesu	13
1.1.1 Adheze	13
1.1.2 Koheze	13
1.2 Lepidla na papír	14
1.2.1 Kaseinová lepidla	14
1.2.2 Klihová (glutinová) lepidla	14
1.2.3 Škrobová a dextrinová lepidla	15
1.3 Metody kontroly kvality naneseného lepidla	15
1.3.1 Optické metody kontroly	16
2 Optické zvýraznění luminofory	17
2.1 Luminiscence	17
2.1.1 Fotoluminiscence	17
2.1.2 Fluorescence	17
2.1.3 Fosforescence	18
3 Dostupné vybavení	20
3.1 Zákaznické zadání	20
3.2 Volba vybavení, měření optických vlastností použitého lepidla	20
3.2.1 Kamera Baumer VCXG-53C	20
3.2.2 UV světlo SmartView Spotlight SP-26UV18	21
3.2.3 Laboratorní měření	22
3.2.4 Pořízení testovacích snímků	23
II Návrh kontrolního pracoviště a metod zpracování obrazu	26
4 Parametry pracoviště a návrh 3D modelu	27
4.1 Kontrolní pracoviště	27
4.1.1 Způsob skládání dna pytle	27
4.2 Výpočet parametrů optické soustavy	29
4.3 Model kontrolní sestavy	30

5	Metody zpracování obrazu	32
5.1	Segmentace	33
5.1.1	Segmentace prostým prahováním	33
5.2	Definice šablony a její vyhledání v obraze	34
5.2.1	Definice šablony	34
5.2.2	Lokalizace šablony v obraze	34
5.3	Ověření metod v prostředí MATLAB	36
5.3.1	Popis programu	37
5.4	Měření parametrů lepidla	40
5.4.1	Vzájemná korelace - omezení a možnosti využití	40
5.4.2	Měření plochy lepidla	40
5.4.3	Vady nanášení lepidla	41
6	Návrh kontrolního SW	43
6.1	Baumer ShowMeProcess	43
6.2	Baumer GAPI	44
6.2.1	System	45
6.2.2	Interface	45
6.2.3	Device	45
6.2.4	Data Stream	45
6.2.5	Buffer	45
6.2.6	Baumer Filter Driver	46
6.3	Popis hlavního programu	47
6.3.1	Požadované vlastnosti	47
6.3.2	Funkce zpracování obrazu - OpenCV, EmguCV	47
6.3.3	Blokové schéma kontrolního procesu	48
6.3.4	Nastavení parametrů kamery	50
6.3.5	Podpůrné ovládací a informační prvky	51
6.3.6	Part location - funkce pro vyhledání vzoru	52
6.3.7	Area size - funkce měření plochy lepidla	54
7	Testování u zákazníka	56
7.1	Podmínky testování	56
7.2	Datový set 1 - 4	57
7.3	Datový set - Atypická linka	61
7.4	Zhodnocení výsledků testování	62
8	Závěr	63
	Literatura	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Jablonského diagram energetických hladin a spekter.[12]	18
3.1	Kamera Baumer VCXG-53C.[17]	21
3.2	Bodové osvětlení Smart View SP26UV18 - 385 nm (na obrázku varianta s červenou diodou 633 nm)[18]	22
3.3	Spektrum bodového UV světla, emisní spektrum UV lepidla a propustné spektrum filtru	23
3.4	Porovnání kontrastu lepidla kamerou bez a s BP filtrem	24
3.5	Porovnání extrahovaných modrých kanálů snímků 3.4a a 3.4b.	24
4.1	Fotografie plánovaného měřicího pracoviště.	27
4.2	Nákres pytle s naneseným lepidlem. Šipky 1 a 2 označují pořadí skládání dna.	28
4.3	Detailní nákres obou kroků skládání dna.	29
4.4	3D model měřicího pracoviště.	31
5.1	Segmentovaný tvar lepidla z obrázku 3.5b použitím prostého prahování s prahem o hodnotě 70.	34
5.2	Výběr šablony z vzorového obrazu.[13]	35
5.3	Znázornění posuvu šablony po snímku.[13]	36
5.4	Výsledek korelační funkce zobrazený ve formě obrázku - nejjasnější body představují místo nejvyšší shody šablony a obrazu.[13]	36
5.5	Šablona vytvořená z obrazu scény.	37
5.6	Deformace objektu rozmazáním pohybem do stran a filtrem median, simulujícím roztečení lepidla.	38
5.7	Rozdílové snímky pro rozmazání pohybem a filtrem median. Modré pixely znázorňují oblasti, které na snímku oproti šabloně přebývají, červené naopak zobrazují chybějící části lepidla.	38
5.8	Simulace vady typu chybějící část lepidla a natočení scény o 10°.	39
5.9	Rozdílové snímky pro vadu typu chybějící část lepidla a natočení scény o 10°.	39
5.10	Příklad vady spojené s úbytkem lepidla v zásobníku	42
6.1	Originální podoba příkladového programu Baumer ShowMeProcess. Hlavní část okna zabírá zobrazovaný obraz, v pravé části se nacházejí tlačítka pro využití výchozích funkcí.	44
6.2	Hierarchie transportní vrstvy podle standartu GenICam. [15]	46
6.3	Blokový diagram programu a procesu získání snímku. Funkce filtrací zvýrazněné kurzívou jsou volitelné.	48
6.4	Optický triangulační snímač Baumer O300.GP.[19]	49
6.5	Hlavní okno programu.[16]	50

6.6	Nastavení parametrů kamery na záložce <i>Image Adjustment</i>	51
6.7	Ovládací prvky změny zobrazení, uložení snímku, sekvence snímků nebo videa.	52
6.8	Ovládací a informační prvky simulátoru.	52
6.9	Okno pro nastavení výchozího vzoru lepidla pro následné srovnání korelací.	53
6.10	Zobrazení výsledku korelace v hlavním okně programu.	54
6.11	Zobrazení výsledku výpočtu a porovnání plochy v hlavním okně pro- gramu. ¹	55
7.1	Obraz šablony a jeho prahovaná podoba.	58
7.2	Chybový snímek vzniklý vlivem zásahu obsluhy do výrobního procesu.	58
7.3	Vzájemná korelace šablony a obrazu v rámci testovacího setu 2 - his- togram	59
7.4	Plocha pixelů lepidla v rámci testovacího setu 2 - histogram	59
7.5	Vzájemná korelace šablony a obrazu v rámci testovacího setu 3 - his- togram	60
7.6	Plocha pixelů lepidla v rámci testovacího setu 3 - histogram	60
7.7	Pravidelné opakování úbytku lepidla v horní části vzoru - Datový set 3	61
7.8	Tabulka shrnující údaje z jednotlivých měření.	62

SEZNAM TABULEK

4.1	Tabulka parametrů pro výpočet ohniskové vzdálenosti objektivu. . . .	29
-----	--	----

ÚVOD

Tato diplomová práce se věnuje oblasti návrhu kamerového systému pro průmyslovou kontrolu celistvosti nanesení UV fluorescentního lepidla na povrch dna papírového pytle. Je rozdělena na dvě hlavní části:

1. Rešerše dostupných metod a používaného vybavení
2. Návrh kontrolního pracoviště a metod zpracování obrazu

V první části jsou zhruba prozkoumány varianty používaných lepidel, jejich mechanické a fyzikální vlastnosti a také je věnována pozornost výhodám lepení oproti jiným druhům nerozebíratelného spojování materiálů. Dále se v této části nachází kapitola pojednávající o fyzikální podstatě luminiscence a jejích možných variantách v podobě fluorescence a fosforescence. Poslední kapitolou této části je popis kontrolovaného lepidla, především v podobě jeho optických vlastností. Dále jsou zde diskutovány vlastnosti dostupné kamery a průmyslového osvětlení. Součástí této kapitoly je také laboratorní měření vzorků lepidla a volba vhodného optického filtru.

Druhá část práce se nejprve soustředí na prozkoumání možností kontrolního pracoviště a dále pak na související návrh 3D modelu měřicí sestavy. Rovněž jsou zde obsaženy výpočty parametrů optické soustavy pro volbu vhodného objektivu ke kameře. Další kapitola práce se věnuje návrhu a implementaci metody pro stanovení vzorové šablony lepidla a její následné vyhledání v obraze. Druhou testovanou metrikou je měření plochy lepidla ze segmentovaného binárního obrazu. Závěrem kapitoly jsou uvedeny některé časté vady vyskytující se při nanášení lepidla.

V rámci této části práce je obsažena také rozsáhlá kapitola popisující návrh kontrolního softwaru v programovacím jazyce C#, jakožto hlavního programu, implementujícího výše popsané metody zpracování obrazu.

Poslední kapitola práce se zaměřuje na průběh a výsledky testování navrženého kontrolního programu v prostředí výrobní linky.

Část I

Rešerše používaných metod a dostupného vybavení

1 LEPIDLA A JEJICH VLASTNOSTI

1.1 Podstata lepícího procesu

Lepení je proces, při kterém za pomoci lepidla vzniká zpravidla nerozebíratelný a trvalý spoj dvou stejných nebo různých materiálů. Lepení má oproti jiným formám spojování řadu výhod. Například porovnáním s běžnými nerozebíratelnými spoji, jakými jsou šroubová nebo nýťová spojení, při lepení nedochází k výraznému navýšení hmotnosti výsledné sestavy, lepený spoj umožňuje lepší distribuci mechanického napětí. Trvanlivost a pevnost lepeného spoje nezávisí jen na použitém lepidle, ale i na adhezi spojovaných povrchů, homogenosti nanášené vrstvy lepidla a také podmínkách okolního prostředí (vlhkost, teplota aj.) a typu namáhání spoje. [1][2]

Pevnost lepeného spoje závisí na několika parametrech:

- Přílnavost lepidla k oběma lepeným povrchu (adhezní spojení)
- Vnitřní soudržnost (pevnost) samotného lepidla (kohezní spojení)
- Povrchové napětí a smáčivost lepeného povrchu
- Pevnost lepených materiálů

1.1.1 Adheze

Základním předpokladem pro spojení dvou povrchů pomocí lepení je dobré přilnutí lepidla k povrchům. Pokud lepidlo není schopné dostatečně přilnout k lepeným povrchům, dochází k rozlepení spoje na rozhraní lepeného povrchu a lepidla a vlastní soudržnost lepidla dále nehraje roli. Adhezní síly mezi povrchem a lepidlem spočívají v zatečení a vyplnění pórů a nerovností obou povrchů, v případě silných lepidel v chemickém narušení povrchů a navázání na ně. Čistě adhezní spojení se uplatňuje především při lepení měkkých materiálů jako jsou dřevo, papír, porézní nízkohustotní plasty (pěnové plasty) apod. Chemické spojení má svůj význam především pro leštěné povrchy jako jsou hladké plasty a kovy.

S přilnutím lepidla k povrchu úzce souvisí také povrchové napětí a to jak lepidla, tak smáčeného povrchu. Pokud je povrchové napětí lepidla nižší než povrchové napětí materiálu, dojde k rozlití lepidla po povrchu materiálu. V opačném případě vytvoří kapalina na povrchu spojovaných materiálů kapky a výsledný spoj bude mít špatné mechanické vlastnosti, v krajním případě vůbec nevznikne.

1.1.2 Koheze

Pokud lepidlem docílíme dobrého smáčení povrchu, případně chemického navázání s materiálem, je dalším důležitým parametrem vnitřní soudržnost lepidla - tzv. koheze. V případě měkkých materiálů jako je dřevo nebo papír, není zpravidla limitujícím

faktorem celkové pevnosti spoje pevnost samotného lepidla, ale spíše adhezní pevnost a pevnost samotného materiálu. Pokud ale lepidlo slouží ke spojování pevných materiálů - kovů, plastů apod., stává se vnitřní pevnost lepidla významnou veličinou. Kohezní pevnost lepidla závisí jednak na složení lepidla (např. vícesložková epoxidová lepidla mají vyšší pevnost než akrylátová lepidla na papír) a také na míře tepelného namáhání spoje (většina jednosložkových lepidel měkne při zvyšování teploty). [1]

1.2 Lepidla na papír

Lepidla lze obecně dělit podle různých kritérií jako jsou účel použití, princip tuhnutí, obsah rozpouštědel, organický nebo syntetický původ, aj. V případě lepidel na papír se nejčastěji využívá tekutých lepidel přírodního nebo syntetického původu s principem tuhnutí vlivem vsáknutí a odpaření rozpouštědel nebo vody. Základní složkou těchto lepidel je přírodní nebo synteticky vytvořená polymerní látka, která se mísí s vodou nebo organickými rozpouštědly za vzniku roztoků nebo disperzí. Papír rovněž splňuje základní předpoklad paropropustnosti pro správné tuhnutí lepidel na této bázi. [3]

1.2.1 Kaseinová lepidla

Lepidla na této bázi mají původ v mléčných produktech - např. kravské mléko tvoří asi z 80 procent právě kasein. [5] Vzhledem k přírodní povaze je jejich hlavní nevýhodou malá odolnost proti tvorbě plísní a také malá odolnost proti vodě. Pro zlepšení voděodolnosti se ke kaseinovým lepidlům přidávají pryskyřice, latexy a jiné přísady. [3][6]

1.2.2 Klihová (glutinová) lepidla

Nejčastěji se využívají ve formě vodných roztoků kostního a kožního klihu jatečných zvířat. Glutin se tvoří z kolagenu, základního stavebního prvku pojivových tkání, a lze jej z kolagenu získat i za pomoci horké vody. Ve studené vodě se nerozpouští, při 55°C přechází ve velmi viskózní roztok použitelný pro lepení. Následným ochlazením a vysušením tuhne. Tak jako u většiny bílkovin dochází i u glutinu se zvyšující se teplotou k denaturaci až rozkladu na aminokyseliny (okolo 80°C), při kterém dochází ke ztrátě lepidlosti. Podobným způsobem dochází k rozkladu i působením bakterií a plísní. [3][7]

1.2.3 Škrobová a dextrinová lepidla

Jak již název napovídá, škrobová lepidla jsou složena z rostlinného škrobu, bílého prášku bez chuti a vůně, který obsahuje dva polysacharidy: amylozu a amylopektin. Vzhledem k jeho povaze slouží škrob rostlinám především jako zásobárna energie. V průmyslu se k výrobě lepidel nejčastěji využívá škrob z brambor, pšenice, kukuřice nebo rýže. Po přidání horké vody (62 - 68°C) se stává škrob lepivým. Jelikož jde o přírodní produkt, není samotné škrobové lepidlo, stejně jako ostatní výše popisovaná lepidla, odolné vůči bakteriím a plísním. Pro zvýšení trvanlivosti se k němu proto přidávají různé konzervační látky. Zvláštní kategorii pak tvoří lepidla dextrinová, která vznikají rozpuštěním a následným zahřátím škrobu ve vodě o teplotě 80°C. Škrobová lepidla rovněž nejsou odolná vodě. Jejich výhodou je především příznivá cena. [4]

1.3 Metody kontroly kvality naneseného lepidla

Jak již bylo zmíněno, lepený spoj má oproti jiným nerozebíratelným spojeníům značnou výhodu v rovnoměrné distribuci mechanického napětí po celé své ploše a nedochází tak ke vzniku nežádoucích koncentrátů napětí jako v případě šroubovaného nebo nýtovaného spoje. Toto však platí pouze za předpokladu dokonalého a rovnoměrného nanesení lepidla na spojované povrchy.

V případě manuální aplikace lepidla je relativně jednoduché ihned odhalit nedokonalosti v procesu nanášení a sjednat nápravu. V dnešní době široké automatizace procesů však stále větší část prací zastávají stroje a je tedy zcela nezbytné zavádět výstupní kontrolu kvality. Nabízí se samozřejmě možnost přenechat práci kontroly kvality na výstupu stroje opět člověku, který má zcela nepochybně lepší senzorické a především vyhodnocovací kapacity než sebelepší počítačový systém. Takového řešení bývá nicméně z dlouhodobého hlediska ne hospodárné a naráží na fyziologická omezení člověka jakými jsou rychlost kontroly, časná únava z monotónní činnosti apod.

Stále častěji se tak v průmyslu objevují systémy automatické kontroly kvality pracující zpravidla na základě nějaké kvantifikovatelné fyzikální vlastnosti kontrolovaného prvku. Typicky jde o posuzování rozměrů, tvaru, barvy¹, pozice atd. Všechny tyto kontrolní úlohy spadají většinou pod kamerovou kontrolu. Pokud úlohu kontroly zjednodušíme pouze na úroveň detekce přítomnosti, úrovně nebo množství určité vlastnosti daného objektu opět uchopitelné pomocí fyzikálně měřitelné veličiny, můžeme i kontrolní prvek zjednodušit do podoby ať už prostého, např. indukčního,

¹zde se na první pohled může zdát, že se jedná spíše o kvalitativní vlastnost, avšak lehce vyčíslitelnou, typicky v podobě jasových úrovní jednotlivých barevných složek

kapacitního nebo jiného snímače, nebo inteligentního, např. optického triangulačního snímače, případně soustavy více takových snímačů.

1.3.1 Optické metody kontroly

V předchozí části byly zmiňovány možnosti vizuální kontroly lepidla (obsluhou nebo kontrolním systémem) a jejich výhody a nevýhody. Obtížnost této kontroly lze však v obou případech značně snížit, pokud docílíme výrazného barevného kontrastu lepidla vůči povrchu, na němž je nanášeno. U některých aplikací však může nastat stav, kdy není možné provádět kontrolu lepidla v průběhu procesu ihned po jeho nanášení a je třeba kontrolovat již slepený díl. Pokud se přitom jedná o lepení papíru nebo podobného průsvitného materiálu, může být řešením přidání barviva do lepidla pro dodatečnou kontrolu. Speciálním druhem takových přísad jsou bezbarvé UV luminofory, které neovlivňují vzhled lepeného spoje, ale po expozici vhodnému zdroji světla emitují záření ve viditelném spektru, což zajišťuje dostatečný kontrast oproti okolí, potřebný pro kontrolu.[8]

Přítomnost lepidla na povrchu materiálu, přestože je bezbarvé, rovněž znatelně mění odraz dopadajícího světla. V důsledku toho pak pozorujeme změnu lesku lepidlem opatřené oblasti oproti jejímu okolí. Měřením této změny lze však odhalit spíše větší vady, a naopak je necitlivé vůči malým změnám.[8]

Další z možných druhů optických kontrol je měření barvy lepidla pomocí specializovaných optických snímačů. Tato metoda slouží rovněž spíše k detekci přítomnosti než k stanovování podrobnějších parametrů lepidla jako např. tloušťky vrstvy aj.[8]

Zajímavou metodou pro měření tenkých vrstev je elipsometrie. Metoda vychází z měření změny polarizace světla při odrazu od vrstvy lepidla. Většina světelných zdrojů emituje záření skládající se z řady náhodně polarizovaných vln. Existují však i zdroje polarizovaného světla jedné vlnové délky (některé lasery), jejichž výstupní svazek je buď částečně nebo zcela polarizovaný. Pro účely kontroly je vrstva lepidla nasvícena tímto laserem pod známým úhlem a následně měřeným signálem je změna polarizace - amplitudy a fáze odraženého světla. Tloušťka měřené vrstvy přitom může být i menší než je vlnová délka použitého světla. [9] [10]

2 OPTICKÉ ZVÝRAZNĚNÍ LUMINOFORY

2.1 Luminiscence

Luminiscence je obecné označení emise záření spontánně nastávající při přechodu molekuly z excitovaného stavu do základního. Podle druhu energie, jež způsobila přechod molekuly do excitovaného stavu, rozlišujeme různé podkategorie luminiscence jako např.:

- Elektroluminiscence – vyvolána působením vnějšího elektrického pole nebo průchodem elektrického proudu
- Chemiluminiscence – vyvolána chemickou reakcí (patří sem i bioluminiscence, kdy je emise světelného záření vytvořena živými organismy)
- Termoluminiscence – vyvolána nárůstem teploty molekuly dodáním tepelné energie z vnějšího zdroje
- Radioluminiscence – luminiscence vyvolaná působením ionizujícího záření
- Fotoluminiscence – luminiscence vyvolaná neionizujícím elektromagnetickým zářením o vhodné energii

V rámci této práce bude s ohledem na řešenou problematiku blíže popsána podkategorie fotoluminiscence.

2.1.1 Fotoluminiscence

Fotoluminiscence je emise světla nastávající po absorpci fotonů (elektromagnetického záření). Jedná se o jednu z mnoha forem luminiscence a je vyvolána v důsledku excitace fotony dopadajícího záření a následnými procesy relaxace molekul exponované látky, trvajícími v řádech v rozmezí femtosekund až milisekund, nejčastěji však v destíkách nanosekund. Ve speciálním případě fosforescence dochází k postupné relaxaci přes tzv. „zakázané“ přechody (možné pouze z kvantového hlediska) a emise záření pak může trvat i několik hodin. [11] Celý proces je podmíněný jednak přítomností molekul schopných přechodu na vyšší energetickou úroveň a rovněž expozicí excitačnímu záření vhodné vlnové délky. Rovněž platí, že emitované záření má obecně nižší energii, tedy větší vlnovou délku než, záření excitační.

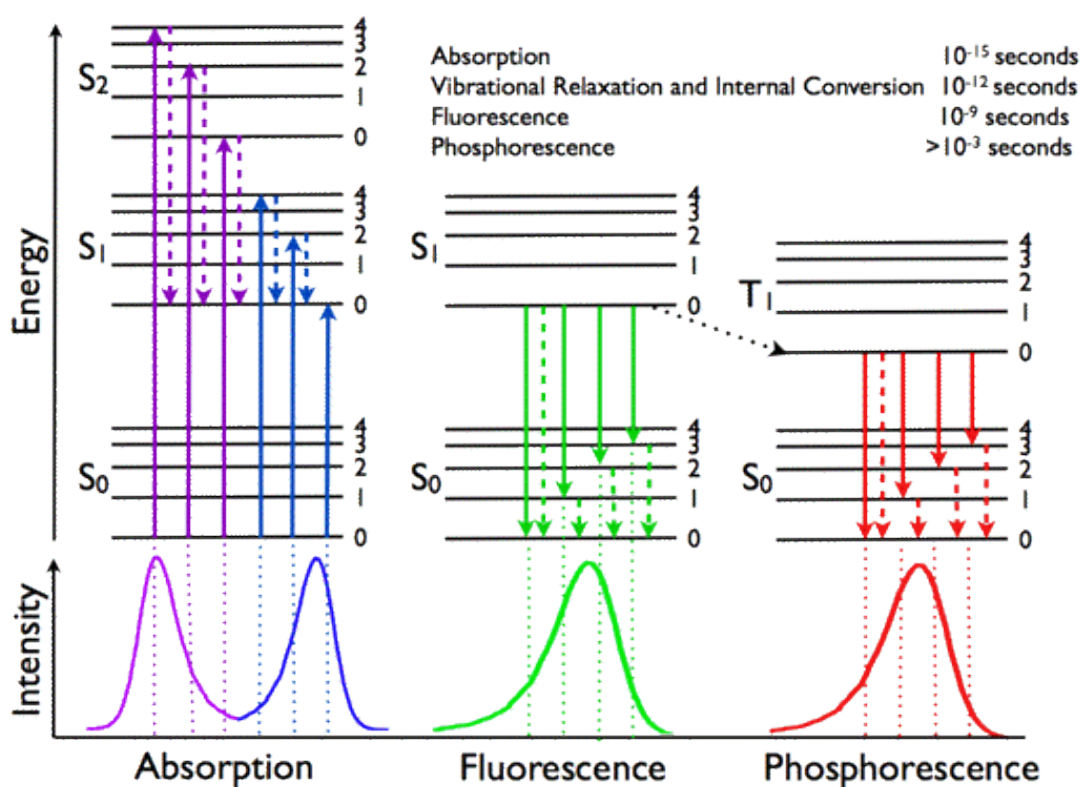
2.1.2 Fluorescence

Jedním ze specifických druhů luminiscence je jev zvaný fluorescence. Při tomto jevu dochází k emisi fotonů určité energie vlivem dopadajícího excitačního záření. Je to pak specifický především tím, že velmi krátce po ukončení expozice excitačnímu záření (v řádech mikrosekund) dojde k zániku emise fotonů. Při pokojové teplotě se

většina molekul nachází na základní energetické hladině a při absorpci dopadajícího světla dojde k jejich excitaci na vyšší energetickou hladinu. Na této vyšší hladině však molekula nedokáže dlouho setrvat a relaxačním procesem se brzy vrací zpět na původní energetickou hladinu. Při relaxaci pak dochází k uvolnění energie ve formě fotonu, kterou pozorujeme jako fluorescenci.

2.1.3 Fosforescence

Fosforescence je dalším druhem luminiscenčního záření, kterého mohou jisté látky po expozici excitačnímu záření dosahovat. Na rozdíl od fluorescence se zde neuplatňují pouze relaxace přes povolené energetické přechody, ale dochází k přechodům zakázaným, jež jsou kineticky znevýhodněny a probíhají tak často velmi pomalu, což vede k delšímu času trvání zářivého děje. Pro znázornění energetických úrovní molekul lze využít Jablonského diagramu, který názorně ukazuje jednotlivé přechody do a z excitovaných stavů.



Obr. 2.1: Jablonského diagram energetických hladin a spekter.[12]

Na obrázku 2.1 je zachycen příklad znázorňující energetické úrovně, jimiž prochází elektrony fluorescentní a fosforescentní látky po absorpci záření. Plné šipky

znázorňují zářivé přechody při absorpci fotonu (fialová, modrá) nebo emisi (zelená barva v případě fluorescence, červená v případě fosforescence). Šipky s přerušovanou čarou znázorňují nezářivé přechody, ke kterým dochází při vnitřních konverzích, tedy přechodech mezi jednotlivými vibračními stavy molekul, kdy se nemění spin elektronů. S_0 , S_1 a S_2 pak označují jednotlivé energetické hladiny, S_{x-y} (např. S_{0-1}) označují mezistavy, kolem kterých se může molekula na dané energetické hladině nacházet vlivem ztrát energie vibracemi a rotací. Tečkovaná čára mezi S_{1-0} a T_{1-0} označuje zakázaný nezářivý mezisystémový přechod se změnou spinu elektronů, který se uplatní v případě fosforescence. Nutno dodat, že samotný přechod z S_{1-0} do T_{1-0} je rovněž nezářivý, avšak vlivem jeho již zmiňované malé rychlosti a nízké pravděpodobnosti výskytu slouží jako postupně uvolňovaný zdroj energie pro následný, již zářivý, přechod ze stavu T_{1-0} do stavu S_0 .

3 DOSTUPNÉ VYBAVENÍ

3.1 Zákaznické zadání

Cílem kontrolního systému je v reálném čase odhalit vady v procesu nanášení lepidla pomocí obtisku rotujícího válce s tvarovanou předlohou na definovaných místech papírových pytlů. Systém musí obsluhu umožnit nejprve stanovit správnou podobu nanášeného lepidla a tuto následně porovnávat se skutečným stavem. Dále musí v proměnlivé rychlosti výrobní linky stanovit dvoustavový výsledek kontroly (OK / NOK) a ten následně předat nadřazenému systému. Maximální takt linky je stanoven na 333 ks papírových pytlů za minutu, což odpovídá 5,55 ks/s, při velikosti pytle 350 - 400 mm. Z toho vyplývá maximální rychlost linky 2,22 m/s. Maximální rozměr pytle může činit 650 x 230 mm.

3.2 Volba vybavení, měření optických vlastností použitého lepidla

3.2.1 Kamera Baumer VCXG-53C

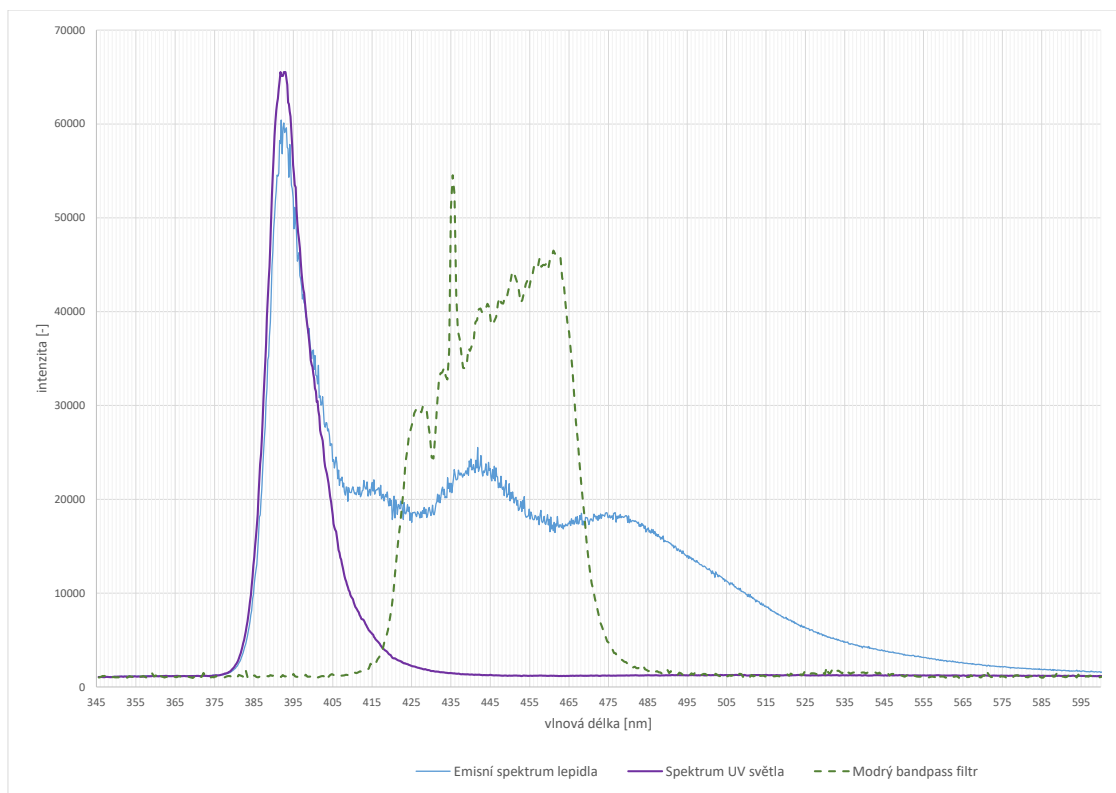
Po definování podmínek snímání scény je možné přejít k volbě potřebného vybavení. Základem kontroly je volba vhodné kamery, která závisí na více faktorech, jako požadované rozlišení obrazu, potřebná rychlost snímání, komunikační rozhraní a samozřejmě cena. Z nabídky kamer Baumer byla po zvážení těchto parametrů zvolena kamera s označením VCXG-53C. Jedná se o průmyslovou kameru kompaktních rozměrů 29x29x65mm s komunikačním rozhraním Gigabit Ethernet, osazenou 1" barevným CMOS snímačem PYTHON 5000 od výrobce ON Semiconductors, s rozlišením 2592x2048 px. Doba expozice je nastavitelná od 20 μ s do 1000 ms. Kamera dosahuje při maximálním rozlišení snímkové rychlosti až 23 fps, respektive až 28 fps v případě tzv. Burst Mode režimu, který je schopen využívat volných okamžiků, kdy kamera čeká na signál pro zaznamenání dalšího snímku a je tak právě v nečinnosti, k odeslání uložených snímků z její mezipaměti. Napájení a digitální vstupy/výstupy kamery jsou sdruženy v osmipinovém konektoru velikosti M8 na zadní straně nad konektorem pro Ethernet. Napájecí napětí je možné volit v rozmezí 12-24 V DC, případně 36-57 V DC pokud se rozhodneme kameru napájet pomocí tzv. PoE, jež umožňuje použít Ethernetový kabel zároveň k napájení. V přední části kamery se nachází objektivový závit typu C-Mount a po stranách pak montážní otvory se závitem M3 x 4. Před samotný snímač je možné osadit filtr tloušťky 1 mm, který lze snadno umístit pod kruhový držák s bajonetovým zámkem. [17]



Obr. 3.1: Kamera Baumer VCXG-53C.[17]

3.2.2 UV světlo SmartView Spotlight SP-26UV18

Volba správného osvětlení je pro tuto aplikaci zcela zásadní, a proto byly od společnosti SmartView zapůjčeny pro testování dvě varianty UV bodových světel - s vlnovou délkou 365 nm a 385 nm. Jak bylo popsáno v teoretickém úvodu, luminofor v lepidle reaguje pouze na určitou vlnovou délku světla a jelikož se přesnou hodnotu nepodařilo od zákazníka získat, bylo nutné vlnovou délku zjistit experimentálně. Ukázalo se, že při použití světla o vlnové délce 385 nm byl luminofor zřetelně viditelný v podobě jasně modré až tyrkysové barvy. Naopak při použití kratší vlnové délky 365 nm byl efekt luminiscence velice slabý a kontrast mezi obrysy lepidla a podkladem byl zcela nedostatečný. I když se tedy v druhém případě jednalo o zařízení s vyšší energií, potvrzuje se fakt, že luminofor je citlivý pouze na určitou vlnovou délku světla. Na základě experimentu byla tedy vybrána varianta s vlnovou délkou 385 nm. Světlo je osazené LED diodou o výkonu 2,8W a optikou s vyzařovacím úhlem 18°. Napájení světla je možné pomocí 24 V DC, kromě napájecích vodičů se na vstupním 3 pinovém konektoru nachází ještě vstup pro externí signál spuštění (trigger). [18]



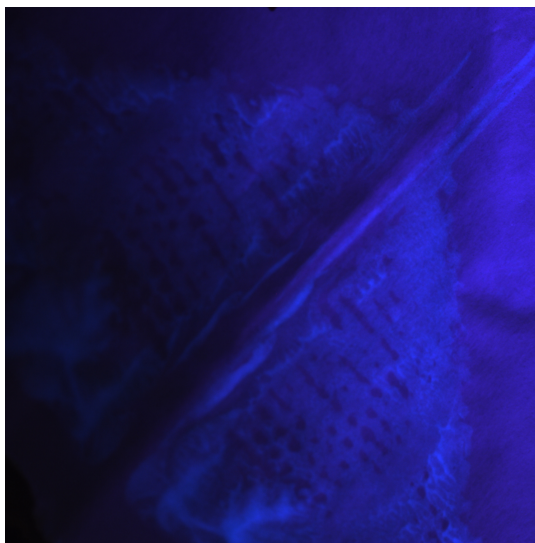
Obr. 3.3: Spektrum bodového UV světla, emisní spektrum UV lepidla a propustné spektrum filtru

3.2.4 Pořízení testovacích snímků

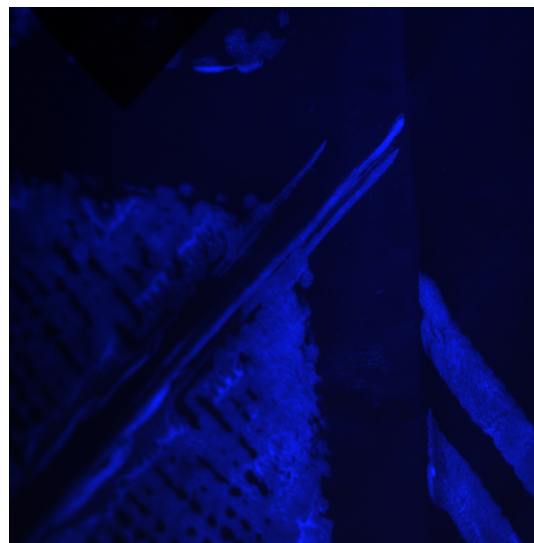
Po změření spekter a volbě vhodného filtru bylo možné přistoupit k otestování předpokladů pomocí kamery. Pro obsluhu kamery byl využit základní nástroj Baumer Camera Explorer, který umožňuje nastavovat rozličné parametry kamery (expoziční čas, aktivní rozlišení snímače v obou osách, zesílení apod.) a rovněž ukládat jednotlivé snímky. Před snímač kamery byl umístěn filtr upravený na vhodnou velikost a kamera byla následně osazena objektivem Kowa LM25HC 25mm/f1,4.

Pro otestování proveditelnosti úlohy je postačující v tomto kroku zachovat alespoň přibližné parametry výsledné scény, jakými jsou vzdálenost kamery a měřeného vzoru lepidla a vzdálenost a počet osvětlovacích prvků. V případě zákaznické realizace lze počítat se vzdáleností kamery od linky okolo 50 cm a vzdáleností osvětlení okolo 20 cm. S ohledem na tyto skutečnosti byly pořízeny i testovací snímky.

Podstatným parametrem pro otestování expoziční doby je pak především vzdálenost bodového osvětlení od snímané plochy, jelikož jeho intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje. Klíčové je přitom především dodat dostatek energie luminoforu v lepidle, což přímo souvisí právě se vzdáleností zdroje osvětlení od snímané

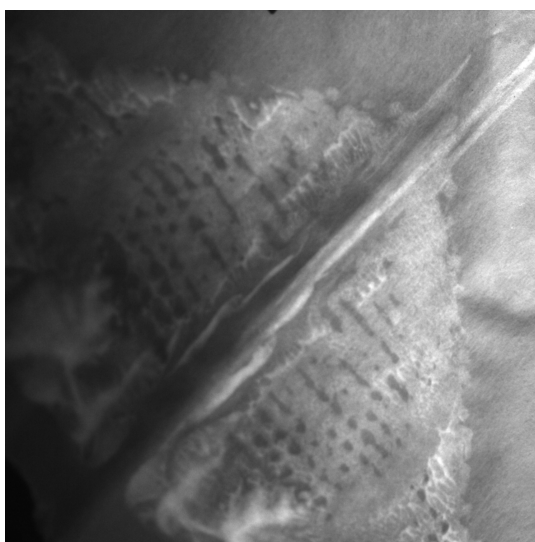


(a) Obrázek zachycený kamerou bez filtru.

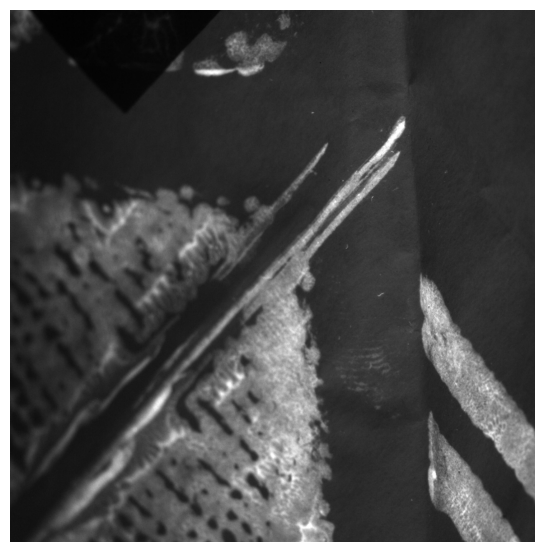


(b) Obrázek zachycený s modrým BP filtrem.

Obr. 3.4: Porovnání kontrastu lepidla kamerou bez a s BP filtrem



(a) Extrahovaný modrý kanál z 3.4 (a)



(b) Extrahovaný modrý kanál z 3.4 (b)

Obr. 3.5: Porovnání extrahovaných modrých kanálů snímků 3.4a a 3.4b.

plochy.

Na 3.4 můžeme vidět srovnávací snímky téhož vzorku lepidla pořízené nejprve bez a poté se zvoleným pásmovým filtrem. Na obrázku 3.4a je dobře patrné zastoupení červené barvy, která rozhodně není příspěvkem fluorescence lepidla, vyskytuje se v celé ploše snímku a pouze zhoršuje celkový kontrast. Naopak na vedlejším snímku 3.4b je patrné zvýšení kontrastu lepidla ve prospěch modrého kanálu a téměř úplné odstranění červené a zelené barevné složky. Obrázky 3.5a a 3.5b pak rovněž slouží

k porovnání kontrastu původních snímků po úpravě ve smyslu odstranění R a G kanálu z původních snímků. Při tomto druhém srovnání je přínos modrého filtru již velmi dobře patrný a značné zvýšení kontrastu je na první pohled viditelné.

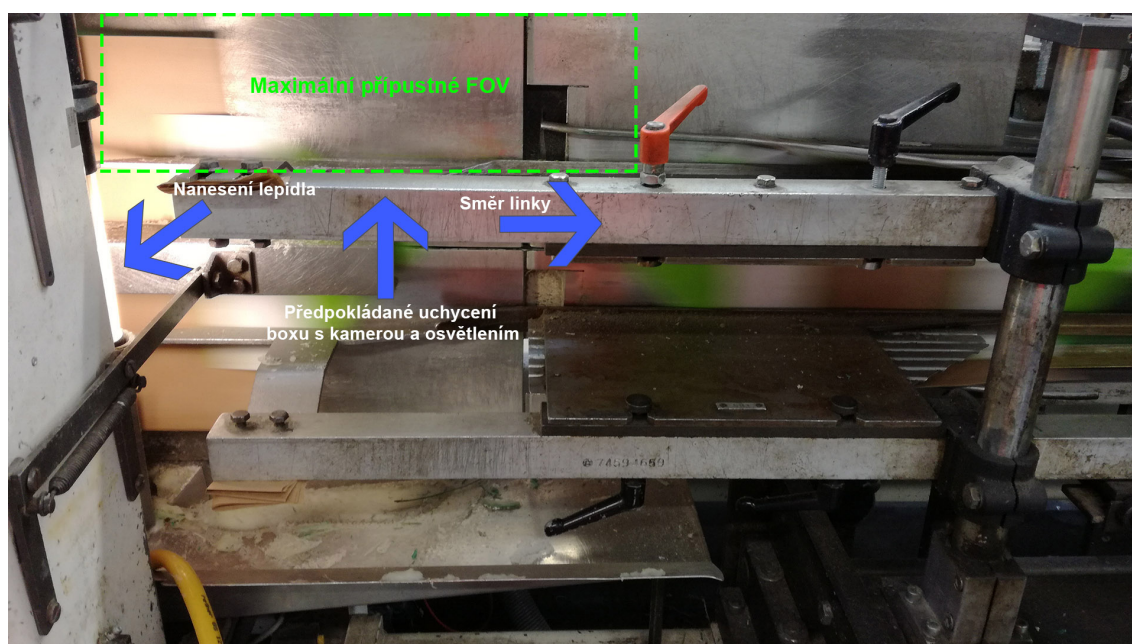
Část II

Návrh kontrolního pracoviště a metod zpracování obrazu

4 PARAMETRY PRACOVIŠTĚ A NÁVRH 3D MODELU

4.1 Kontrolní pracoviště

Měřicí pracoviště se bude u zákazníka nacházet v prostředí výrobní linky bezprostředně za dávkovacím strojem, kde je pro celý systém dostatek místa. Sestavu s kamerou a osvětlením uzavřenou ve vhodném krytu, který zabrání pronikání okolního osvětlení do oblasti kontroly, lze připevnit k hliníkovému rámu linky. Fotografie plánového umístění kontroly se nachází na obrázku 4.1. Jelikož jsou pytle na lince řazeny s rozstupem, je kromě kamery a osvětlení potřeba zajistit také vhodnou detekci hrany pytle. K tomuto účelu nejlépe poslouží optický snímač s potlačeným pozadím, umístěný na rámu krytu, směřovaný proti mezeře mezi zadními plechovými díly linky (viz 4.1).



Obr. 4.1: Fotografie plánovaného měřicího pracoviště.

4.1.1 Způsob skládání dna pytle

Na obrázku 4.1 vidíme v podstatě jen jednu polovinu celé linky. Papírový pytel je linkou unášen tak, že jsou jeho stěny k sobě přitisknuty a obě dna vystupují z obou stran linky v rozloženém stavu, až do okamžiku nanesení lepidla a následného složení.

Boční stěna pytle

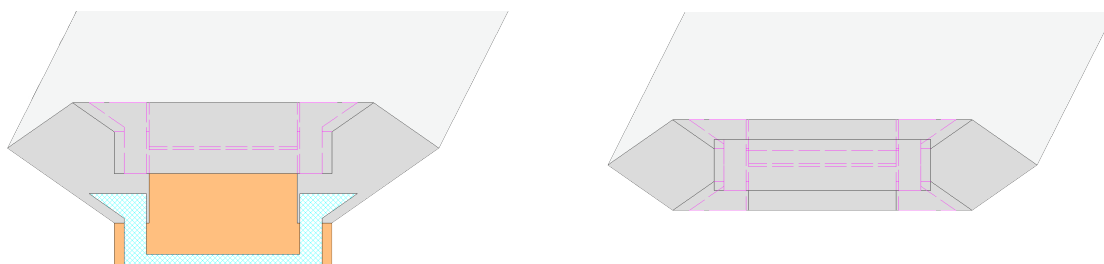
Nanesené lepidlo

Směr pohybu

1.

2.

Samotné skládání dna sestává ze dvou postupných kroků. Nejdříve se přeloží horní část dna, na které není lepidlo nanášeno v celé délce, ale pouze v rozích dna. Kdyby zde bylo lepidlo nanášeno po celé délce, došlo by po uzavření a naplnění pytle ke kontaktu části lepidla s náplní pytle. V druhém kroku se přeloží spodní část dna a z části tak překryje horní, již přilepenou část. Oba kroky skládání jsou naznačeny na dvojici obrázků 4.3 níže.



(a) Podoba dna pytle po prvním kroku skládání.

(b) Podoba dna pytle po druhém kroku skládání.

Obr. 4.3: Detailní náčrty obou kroků skládání dna.

4.2 Výpočet parametrů optické soustavy

Ze známých rozměrů objektu, vzdálenosti kamery od objektu a parametrů samotné kamery lze na základě několika rovnic vypočítat nejvhodnější ohniskovou vzdálenost objektivu.

Parametr	Hodnota
Velikost objektu (š x v)	650 x 230 mm
Vzdálenost objektu od kamery	500 mm
Rozlišení snímáče	2592 × 2048 px
Velikost pixelu	4,8 x 4,8 μm
Velikost snímáče	1" (12,44 x 9,83 mm)

Tab. 4.1: Tabulka parametrů pro výpočet ohniskové vzdálenosti objektivu.

Pro výpočet ohniskové vzdálenosti vyjdeme ze vztahu známého jako zobrazovací rovnice:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

kde a je předmětová vzdálenost, a' je obrazová vzdálenost a f je ohnisková vzdálenost a rovnice optického zvětšení:

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} \quad (4.2)$$

kde y' je velikost obrazu a y je velikost předmětu. Z rovnice 4.2 dostáváme vyjádřením členu $\frac{1}{a'}$ následující vztah:

$$\frac{1}{a'} = -\frac{y}{y'} \cdot \frac{1}{a} \quad (4.3)$$

Dosazením za $\frac{1}{a'}$ v rovnici 4.1 dostáváme tedy vztah:

$$\begin{aligned}\frac{1}{a} - \frac{y}{y'} \cdot \frac{1}{a} &= \frac{1}{f} \\ \frac{1}{a} \cdot \left(1 - \frac{y}{y'}\right) &= \frac{1}{f}\end{aligned}\tag{4.4}$$

V rovnici 4.4 odpovídá a pracovní vzdálenosti mezi kamerou a objektem, y je velikost objektu, y' záporně vzatá korespondující velikost snímáče a f výsledná ohnisková vzdálenost.

Upravením a dosazením hodnot tedy dostáváme následující rovnice:

$$f = \frac{a}{1 - \frac{y}{y'}} = \frac{500}{1 - \frac{650}{-12,44}} = 9,4 \text{ mm}\tag{4.5}$$

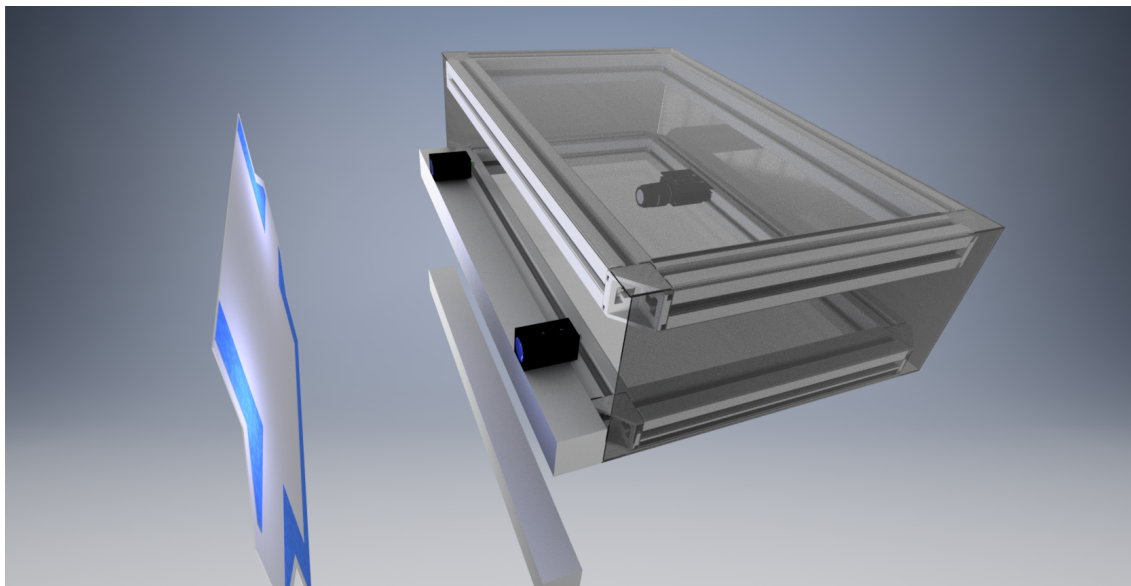
$$y = -\frac{y' \cdot (a - f)}{f}\tag{4.6}$$

Z výpočtu pomocí rovnice 4.5 tedy vyplývá, že při ohniskové vzdálenosti 9,4 mm a vzdálenosti 500 mm kamery od objektu bude delší strana FOV měřit 650 mm. Kratší strana pak bude s použitím rovnice 4.6 pro toto ohnisko měřit 513 mm, což je více než je požadováno velikostí objektu v této ose. Jelikož je ale nejbližší standardní ohnisková vzdálenost objektivů 8 mm, bude při jeho použití FOV o velikosti 765,1 x 604,6 mm. Přesah maximálního rozměru objektu o 100 mm v horizontálním směru poskytuje navíc vhodnou toleranci, při uvážení faktu, že se kontrolovaná oblast lepidla velmi často nachází na okraji pytle a rovněž běžné geometrické vady objektivů mají výrazné zkreslení právě v krajích obrazu. Ve vertikálním směru je pak rozsah zbytečně velký a může docházet k zbytečnému zahlcování systému nepotřebnými obrazovými daty. Tento problém lze však snadno vyřešit omezením ROI - oblasti zájmu, které je možné nastavit jako jeden z parametrů kamery.

4.3 Model kontrolní sestavy

3D model sestavy boxu s kamerou a světly, vytvořený v prostředí modelačního softwaru Autodesk Inventor, je ukázán na obrázku 4.4. Model neslouží pouze k lepší představě o kontrolním pracovišti, ale bude následně využit pro reálné zkonstruování krycího boxu. Rám boxu je vytvořen ze standardních hliníkových profilů 45x45 mm, spojených v rozích pomocí úhelníků. Zvenku je k rámu ze všech stran kromě

čelní stěny upevněno krycí plexisklo¹. Celý box je zavěšen a zajištěn přišroubováním k rámu linky v místech označených na obrázku 4.1.



Obr. 4.4: 3D model měřicího pracoviště.

¹Krycí box je na modelu pro lepší znázornění vnitřního uspořádání zobrazen s polopropustným plexisklem, ve skutečnosti bude však použito černé netransparentní plexisklo

5 METODY ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Předtím než budou uvedeny samotné metody zpracování obrazu, je vhodné připomenout důležitost pečlivého návrhu scény. Při návrhu existuje vždy více možností a přístupů vedoucích k řešení, ale v případě, že dobře zvážíme využití fyzikálních principů charakterizujících sledované objekty, zpravidla dospějeme k jednoduchému a zároveň robustnímu řešení problému. Odpadá pak nutnost využívat komplikované a často nepřilíš spolehlivé metody zpracování obrazu. Velmi důležitou a často podceňovanou úlohu hraje volba zdroje a směru osvětlení. Při focení běžné fotografie se v případě volby osvětlení řídíme zpravidla estetickou stránkou, kdežto při průmyslovém využití hledáme takové nastavení, které nám přinese nejvíce využitelných informací. Při focení osob tak např. zpravidla nevyužijeme metodu osvětlení formou dark-field (osvětlení pod nízkým úhlem), při kterém dochází k zvýraznění reliéfu nasvíceného objektu, což je naopak pro průmyslové využití často velmi žádoucí (např. kontrola povrchů, přítomnosti nečistot aj.) Součástí volby vhodného osvětlení je kromě směru nasvícení a potřebného výkonu také jeho barva. Pokud bychom např. chtěli detekovat objekt modré barvy mezi ostatními červenými objekty, použitím zdroje modrého světla bychom docílili efektu, při kterém by modrý objekt odrazil světlo s mnohem vyšší intenzitou než okolní červené objekty. Touto jednoduchou úvahou, zakládající se na elementárních fyzikálních principech, v důsledku ušetříme potřebné finanční prostředky použitím černobílé kamery a dostáváme elegantní řešení aplikace, která by jinak při použití bílého světla vyžadovala využití dražší barevné kamery s následným náročnějším zpracováním obrazu a celkově vyšším datovým tokem.

Metody zpracování obrazu jsou obecně velice široký pojem. Prvním krokem při práci s obrazem je zpravidla předzpracování. Podle typu scény se může jednat o filtraci šumu, odstranění rušivých barevných složek, ekvalizaci histogramu aj. Následuje krok segmentace, kdy opět různými metodami určujeme, co je v rámci obrazu oblastí našeho zájmu a co je naopak nezajímavé pozadí. Metod segmentace je přitom opravdu nepřeberné množství. Od prostého prahování, ať už pevně nebo adaptivně nastavovaným prahem, přes segmentaci na bázi hran v obraze, znalostní metody srovnávající se známým vzorem až po hybridní metody využívající morfologické operace nebo neuronové sítě. Výběr vhodné metody pak vychází většinou z apriorní znalosti vlastností objektu v obraze, jimiž mohou být např. znalost barvy, tvaru nebo polohy zkoumaného objektu.

Další úroveň zpracování již úspěšně segmentovaného obrazu je detekce základních tvarů za účelem jejich popisu. Může jít o primitivní geometrické útvary typu čar, kruhů, čtverců nebo o hledání významných bodů obrazu, které zpravidla vymezují hranice nebo části složitějších objektů. Přístupů je opět celá řada a výběr zde již

závisí mimo jiné také na možnostech výpočetní náročnosti zvolené metody.

V rámci této kapitoly budou řešeny pouze vybrané metody zpracování obrazu, vhodné pro kontrolu procesu nanášení lepidla obsahujícího UV luminiscenční složku. V rámci návrhu kontrolního systému se přitom nepředpokládá využití automatických metod detekce tvarů, naopak je předpokladem využití metod srovnávajících obraz se zadaným vzorem. Rovněž bude kladen důraz na co možná nejnížší výpočetní náročnost s ohledem na rychlost linky a také minimální množství vstupních parametrů zadávaných obsluhou, pro zachování jednoduchého a intuitivního ovládání kontrolního systému.

5.1 Segmentace

Jak bylo uvedeno v úvodu kapitoly, existuje řada segmentačních metod. Důležitým předpokladem pro dobré výsledky je zde rovnoměrné nasvícení scény vhodným osvětlením poskytujícím výrazný kontrast popředí od pozadí. Použitím UV zvýrazňující složky lepidla v kombinaci s vhodně zvoleným filtrem je právě tohoto výrazného kontrastu dosaženo (jak bylo ukázáno na obrázcích 3.4), což vede k zjednodušení a zároveň zpřesnění následné segmentace.

5.1.1 Segmentace prostým prahováním

Tento způsob segmentace využívá velmi přímočarý postup. Na základě stanového prahu jasové hodnoty pixelu je rozhodnuto, zda-li se jedná o pixel objektu nebo pixel pozadí. Práh je stanoven zpravidla empiricky rekursivním nastavováním, případně lze využít analýzy histogramu, pomocí kterého lze lépe určit převládající intenzitu pixelů pozadí, kolem které by se měla nacházet optimální hodnota prahu. Výsledný prahovaný obraz je pak binárně reprezentován, tedy pixely popředí mají zpravidla jasovou hodnotu 1 a pixely pozadí jasovou hodnotu 0.

Jelikož bude kontrola probíhat za definovaných a neměnných světelných podmínek, papírový podklad pro lepidlo i lepidlo samotné budou rovněž v průběhu procesu stejné či velmi podobné, lze předpokládat, že bude možné hodnotu prahu nastavit jednorázově při spouštění pro každou kontrolovanou řadu produktů.



Obr. 5.1: Segmentovaný tvar lepidla z obrázku 3.5b použitím prostého prahování s prahem o hodnotě 70.

5.2 Definice šablony a její vyhledání v obraze

5.2.1 Definice šablony

Předpokladem úspěšné kontroly tvaru naneseného lepidla je primárně jeho lokalizace ve scéně. Základem pro tento krok je nadefinování vzorového tvaru ze snímku, na kterém je zachyceno správně nanesené lepidlo. Jako uživatelsky nejpřívětivější metoda pro výběr části obrazu s lepidlem se jeví využití grafického uživatelského rozhraní zobrazujícího daný snímek, s nástrojem pro výběr oblasti daného tvaru (např. obdélník, kružnice nebo obecně mnohoúhelník). Výběr je proveden ze segmentovaného obrazu.

5.2.2 Lokalizace šablony v obraze

Po nadefinování tvaru šablony lze přistoupit k jeho vyhledání v neznámém obraze. Díky přesnému zachycení hrany každého průchozího pytle můžeme s výhodou využít předpokladu, že snímané pytle a lepidlo na nich nanesené by se měly navzájem co nejméně lišit a to nejen fyzicky, ale také polohou, měřítkem a natočením v rámci scény. Tím se výběr vhodné metody hledání šablony značně zjednodušuje. Za předpokladu, že budeme prahovaný snímek považovat za dvourozměrný signál, zapátráním v teorii zpracování signálů zjistíme, že často používaným principem hledání podobnosti dvou signálů je jejich vzájemná korelace. Ta určuje míru jejich lineární závislosti. Pro dva diskrétní signály je jejich vzájemná korelace obecně definována vztahem:

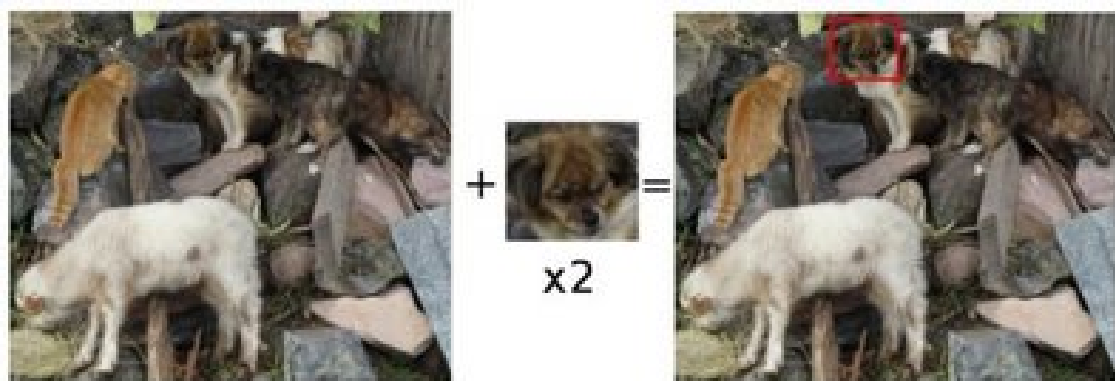
$$r(n) = s(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s(-k) \cdot h(n - k) \quad (5.1)$$

kde r je výsledný korelační koeficient v n -tém porovnávaném vzorku a s a h jsou jednotlivé signály - v našem případě šablona a celý obraz. Závislost $r(n)$ se pak označuje jako korelační funkce.

Při zpracování obrazu je vhodné využít modifikaci vzájemné korelace v podobě její normalizované alternativy [13]

$$r(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot I(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')^2}} \quad (5.2)$$

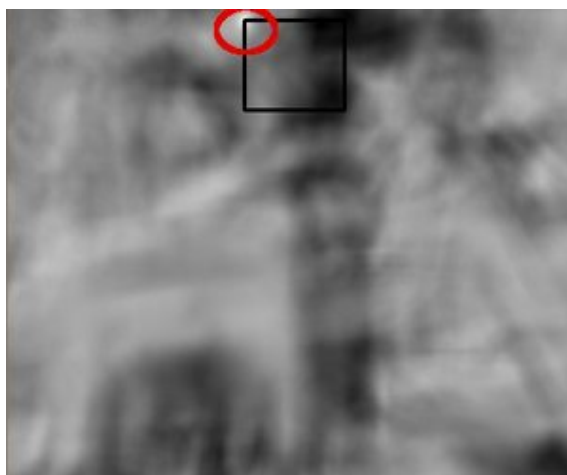
Pokud tedy budeme postupně zkoumat korelaci mezi šablonou a neznámým obrazem, měli bychom být schopni najít maximum korelační funkce $r(n)$ právě v místě výskytu naneseného vzoru lepidla. Celý proces je znázorněn na obrázcích níže:



Obr. 5.2: Výběr šablony z vzorového obrazu.[13]



Obr. 5.3: Znázornění posuvu šablony po snímku.[13]



Obr. 5.4: Výsledek korelační funkce zobrazený ve formě obrázku - nejjasnější body představují místo nejvyšší shody šablony a obrazu.[13]

Nanášení tekutého lepidla ve svislé poloze rotujícím válcem však určitě není metodou dosahující 100% opakovatelnosti tvaru. Proto ani korelace šablony se skutečným naneseným tvarem nebude vždy maximální a je tedy žádoucí, aby bylo možné nastavit míru přípustné odchylky v podobě prahu pro korelační koeficient.

5.3 Ověření metod v prostředí MATLAB

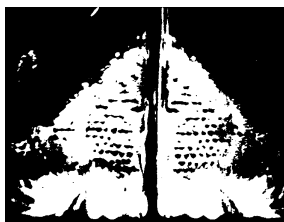
Pro ověření výše popsanych metod bylo využito prostředí MATLAB, které umožňuje jednoduchou práci s obrázky a rovněž je zde implementováno a zdokumentováno

mnoho používaných metod zpracování obrazu, mezi nimiž se nachází i vzájemná korelace.

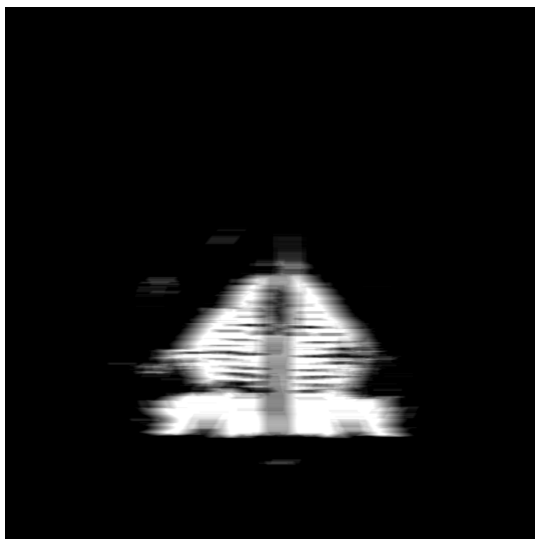
5.3.1 Popis programu

K samotnému ověření byl vytvořen jednoduchý program, který nejprve načte snímek scény a snímek šablony a provede mezi nimi vzájemnou korelaci. Snímky jsou již předem segmentovány a šablona oříznuta grafickým editačním nástrojem. Následuje vykreslení 3D grafu korelačních koeficientů pro všechny zkoumané kombinace a nalezení souřadnic v místě obrazu, na kterém byla nejvyšší míra shody. Dále je zobrazen původní snímek scény, do kterého je oblast shody vyznačena obdélníkem. Tato oblast je následně z obrazu scény extrahována ořezem a vzniklý snímek je porovnán se šablonou pro odhalení rozdílů mezi nimi. Vzniklý rozdílový obraz je pak pro názornost vytvořen tak, že modré pixely zobrazují části, které oproti šabloně přebývají a červené naopak ty oblasti, které v obrazu scény oproti šabloně chybí. Na závěr je zobrazena hodnota maximální dosažené korelace.

Pro tvorbu testovací šablony na obrázku 5.5 byl použit výřez obrázku statické scény zachycené kamerou s filtrem a segmentovaného prahováním, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách. Původní scéna byla grafickým editačním nástrojem upravena aplikací různých filtrů pro simulování možných závad v procesu nanášení lepidla. Pro každou variantu byl program otestován a zobrazen rozdílový snímek a celkový výsledek vzájemné korelace.



Obr. 5.5: Šablona vytvořená z obrazu scény.

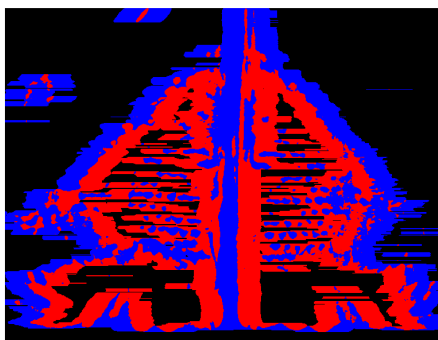


(a) Rozmazání pohybem. Korelace 85,03%

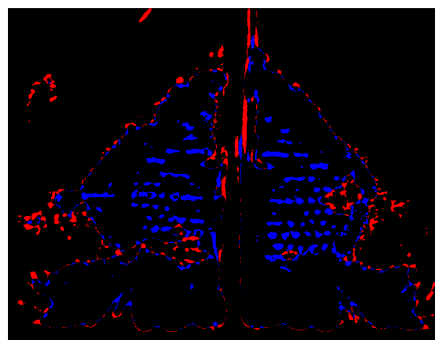


(b) Rozmazání filtrem median. Korelace 87,61%

Obr. 5.6: Deformace objektu rozmazáním pohybem do stran a filtrem median, simulujícím roztečení lepidla.

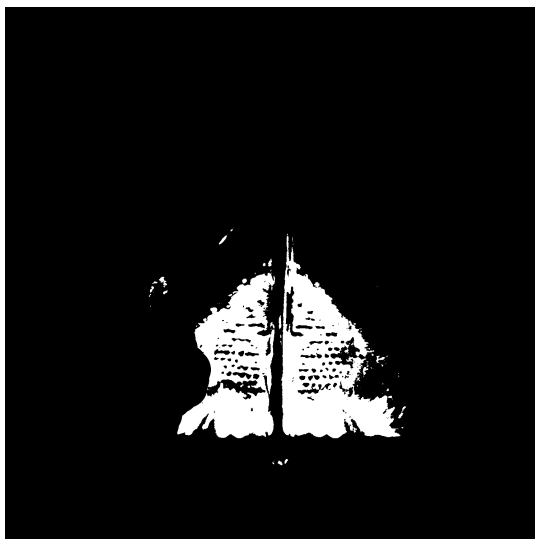


(a) Rozdílový obraz pro rozmazání pohybem.



(b) Rozdílový obraz pro rozmazání filtrem median.

Obr. 5.7: Rozdílové snímky pro rozmazání pohybem a filtrem median. Modré pixely znázorňují oblasti, které na snímku oproti šabloně přebývají, červené naopak zobrazují chybějící části lepidla.



(a) Chybějící část lepidla. Korelace 91,75%

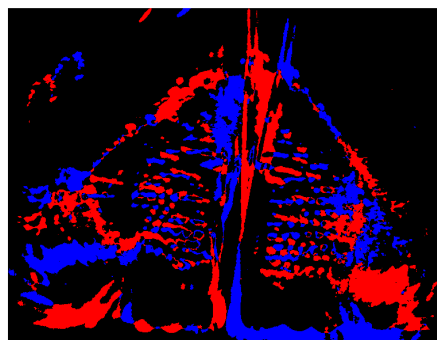


(b) Natočení obrazu o 10° . Korelace 55,83%

Obr. 5.8: Simulace vady typu chybějící část lepidla a natočení scény o 10° .



(a) Rozdílový obraz pro chybějící část lepidla.



(b) Rozdílový obraz pro natočení scény o 10° .

Obr. 5.9: Rozdílové snímky pro vadu typu chybějící část lepidla a natočení scény o 10° .

5.4 Měření parametrů lepidla

V této kapitole jsou diskutovány reálné možnosti navržené korelační metody a rovněž popsány možné způsoby měření klíčových parametrů lepidla s ohledem na zachování jeho mechanických vlastností, včetně definování nejčastějších zdrojů vad nanášení.

5.4.1 Vzájemná korelace - omezení a možnosti využití

Jak bylo ukázáno v předchozí kapitole, vzájemná korelace šablony a obrazu dokáže stanovit kde a s jakou mírou shody se šablona v daném obraze nachází. Dojde-li však k výraznému natočení hledané šablony v obraze, ukazuje výsledek vzájemné korelační funkce na značně nižší míru shody. Již při natočení šablony v obraze o 10° klesla korelace na necelých 56%. Toto je však vzhledem k principu, jakým vzájemná korelace pracuje, zcela pochopitelné. Z obrázku 5.8b je patrné, že i při mírném natočení dochází k výraznému rozdílu v porovnávaných pixelech šablony a obrazu. Možným řešením tohoto problému může být nejprve nalezení maxima korelační funkce pro nerotovanou šablonu a poté postupné natáčení šablony v tomto místě až do nalezení nového maxima korelační funkce. Tento postup však může být použit pouze pro malá natočení, kdy prvotní korelace nerotované šablony s obrazem dává stále dostatečně přesnou informaci o pravděpodobné poloze hledaného vzoru.

Nabízí se dále také možnost hledat již natočenou šablonu. Pokud bychom však uvažovali možnost natočení šablony v jejím celém rozsahu s krokem například 1° , dostáváme 360 variant šablony pro následnou korelaci, což vede k značnému zvýšení celkové výpočetní náročnosti. Patrně by bylo možné tento algoritmus výrazně optimalizovat k dosažení rychlejší konvergence, např. rozdělením oblasti nejprve na 36 variant natočených po 10° a následným zpřesňováním natočení k 1° jen pro relevantní oblast (případně více kandidátních oblastí) s nejvyšší shodou v prvním průchodu.

Problém s natočením může také nastat v případě rotačně symetrických objektů, kdy hrozí riziko nalezení objektu ve zcela odlišné orientaci, než ve skutečnosti je. V případě nanášeného lepidla je však předpoklad natočení v celém rozsahu 360° zbytečně benevolentní a je tedy možné uvažovat pouze malé odchylky od výchozí orientace.

5.4.2 Měření plochy lepidla

Z pohledu mechanických vlastností lepidla je patrně velmi důležitým parametrem množství a celistvost nanesené plochy. Kontrola by se tedy měla zaměřit nejen na posouzení tvaru, ale rovněž na množství přítomného lepidla. K tomuto účelu lze, za předpokladu zachování konstantních světelných podmínek, využít velmi jednoduché, ale efektivní kontrolní metody pro měření plochy v definované oblasti, na základě

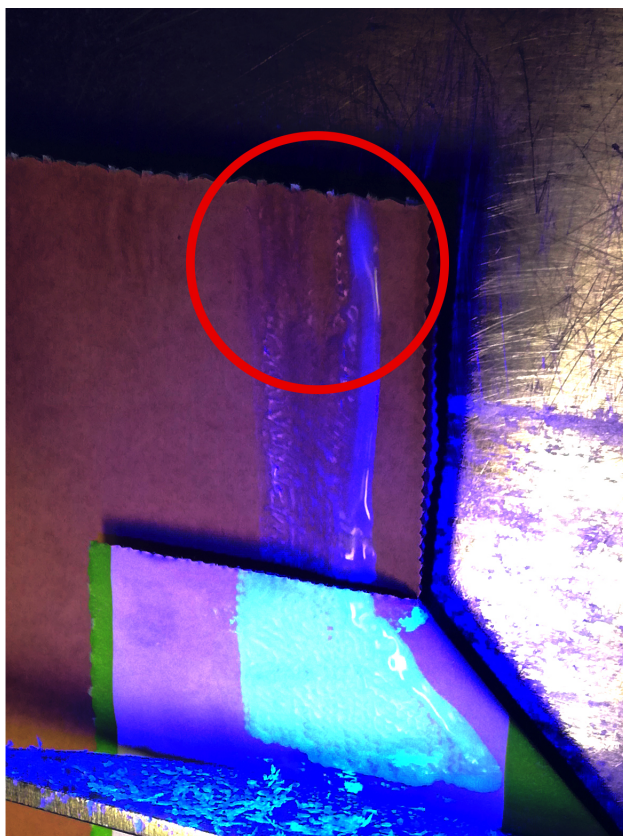
počtu pixelů spadajících nad určitý práh jasové hodnoty. Metoda opět pracuje na principu definování výchozího stavu na základě vzorového snímku s vybranou oblastí zájmu, ve které je nejdříve zapotřebí stanovit práh jasové hodnoty pixelů popředí (pixelů lepidla). Tento postup je tedy shodný jako v případě prahování u metody vzájemné korelace. Jakmile je stanoven práh, je možné v tomto segmentovaném výběru z obrazu prostým průchodem přes všechny obrazové body sečíst ty, které spadají nad zvolený práh. Kontrola již pak spočívá jen v porovnání rozdílu počtu pixelů popředí dané oblasti v aktuálním obraze vůči počtu pixelů v definovaném vzoru. Pokud se počet pixelů liší o více než je uživatelem empiricky stanovená mez, je pravděpodobné, že ve zvolené oblasti došlo k úbytku naneseného lepidla.

Měření plochy lepidla v součinnosti s metodou vzájemné korelace obrazu a vzoru poskytují dostatečné množství informací potřebných k stanovení závěru o kvalitě nanesené vrstvy. Obě metody lze navíc navzájem navázat tak, že pozice měření plochy bude relativní, vztažená vždy k aktuální určené pozici objektu ve snímku na základě korelace se vzorem. Lze tak docílit zachování opakovatelného měření i v případě posuvu obrazu lepidla v rámci scény.

5.4.3 Vady nanášení lepidla

Základem pro návrh kontrolního systému je vždy definování kompletního přehledu kontrolovaných vad. V našem případě vychází požadavky kontroly tvaru a plochy lepidla, naneseného na spoj dna papírového pytle, ze zachování mechanických vlastností lepeného spoje, což je následně předpokladem pro spolehlivé uchování obsahu pytle po jeho naplnění. Před samotným návrhem kontrolních metod je dobré zjistit, jak vůbec vady vznikají. Zákazník v případě této kontroly popsal několik základních původců vad v nanášení:

1. Snížení hladiny lepidla v zásobníku
 - nastává postupně a způsobuje ubývání naneseného lepidla směrem od horní hrany nanášeného vzoru
 - úspěšná detekce úbytku lepidla může předejít vzniku následných vad
2. Cizí předmět na předloze vzoru
 - nastává v případě odtržení kusu papíru z pytle a jeho přilnutí k předloze pro nanášení lepidla
 - způsobuje náhlý úbytek množství nanášeného lepidla v určitém místě šablony
 - může se vyskytnout v kterémkoliv místě lepeného vzoru
3. Mechanické poškození předlohy
 - odlomení části nanášecího vzoru
 - vyskytuje se nejčastěji v případě použití menších šablon s úzkými částmi



Obr. 5.10: Příklad vady spojené s úbytkem lepidla v zásobníku

6 NÁVRH KONTROLNÍHO SW

6.1 Baumer ShowMeProcess

Jak již bylo zmíněno v začátcích práce, motivací pro tento projekt je mimo vyřešení zákaznické aplikace také vytvoření základního softwaru využitelného s kamerami značky Baumer, pro použití v budoucích projektech. Kontrolní software je tedy potřeba od začátku koncipovat jako modulární systém rozšiřitelný o další funkce zpracování obrazu, než jen ty, které budou využity pro tuto konkrétní aplikaci. Pro usnadnění prvotního vývoje softwaru poskytují přední výrobci průmyslových kamer ke svým zařízením jednak rozsáhlé SDK (software development kit) obsahující knihovny a ovladače pro připojení a komunikaci s kamerou a rovněž množství příkladů použití jednotlivých parametrů a funkcí kamery. Tyto příkladové zdrojové soubory dostupné v rámci SDK kamer Baumer jsou k dispozici v programovacích jazycích C++ a C# a implementují např. korektní způsob otevření a uzavření komunikace s kamerou, vypsání dostupných parametrů, způsob správy a přístupu k událostem kamery a mnoho dalších.

Kromě těchto příkladů obsažených v SDK, sloužících mimo jiné i jako jistá část dokumentace funkcí kamery, poskytuje výrobce zdarma pro své distributory a zákazníky také příkladový software nazvaný Baumer ShowMeProcess. Tento program je k dispozici pouze v jazyce C# a ke svému běhu vyžaduje platformu Microsoft .NET Framework v 4.0 nebo vyšší. Součástí balíčku jsou kromě již zkompilovaného spustitelného souboru také všechny zdrojové soubory. Díky tomuto příkladovému programu je tedy možné začít programovat z již existující aplikace zajišťující připojení ke kameře, správu datových proudů a transformaci obrazových dat k zobrazení v grafickém rozhraní. Toto rozhraní je navrženo pomocí knihovny Windows Forms a obsahuje kontejner pro zobrazení aktuálního obrazu, dále pak tlačítka pro uložení aktuálního snímku, sekvence snímků nebo videa. Dále je zde implementován posuvný ovladač pro změnu jasu snímku, respektive expoziční doby a zesílení kamery. Ve spodní části okna se pak nachází informační lišta zobrazující např. aktuální počet zobrazovaných snímků za sekundu, nebo průběh při nahrávání obrazové sekvence. Tyto již implementované funkce byly zachovány pro pozdější případné využití i ve vyvíjeném softwaru.

Příkladový projekt obsahuje několik základních tříd rozdělujících kód přehledně do více kategorií. Toto rozdělení částečně připomíná známý návrhový vzor MVC, které vychází ze tří separátních skupin kódu - Model, View a Controller.

1. Model

- Poskytuje vstupní data pro systém - v případě aktivního spojení s kame-

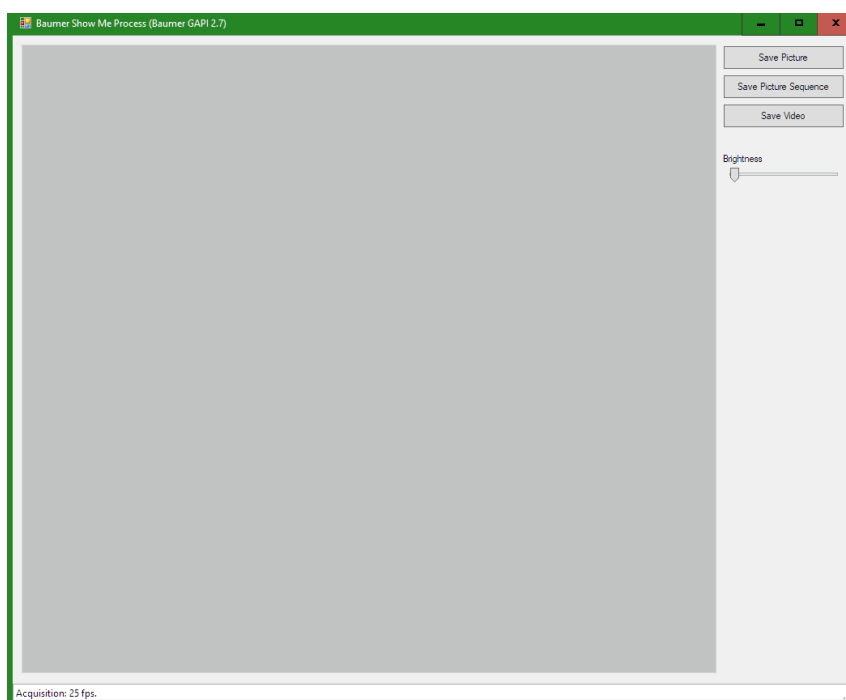
rou je Model kamera, v případě simulačního režimu jsou to data uložena na disku počítače

2. View

- Obstarává zobrazení výstupu uživateli
- Obsahuje definici všech oken a dialogů, které jsou uživateli prezentovány v průběhu práce s programem

3. Controller

- Logika starající se o práci s daty, jejich konverzi a následné prezentování pro View
- Představuje mezičlánek spojující Model a View



Obr. 6.1: Originální podoba příkladového programu Baumer ShowMeProcess. Hlavní část okna zabírá zobrazovaný obraz, v pravé části se nacházejí tlačítka pro využití výchozích funkcí.

6.2 Baumer GAPI

Bezespору hlavní součástí SDK jsou knihovny generického API Baumer GAPI (dále jen BGAPI), které poskytují rozhraní k optimální integraci a ovládání kamer. Základem pro BGAPI je mezinárodní standard GenICam Evropské asociace pro strojové vidění EMVA, který vytváří jedno společné rozhraní pro programování různých typů kamer (i různých výrobců), bez ohledu na použité komunikační rozhraní a implementované funkce - základní společná část API by měla být vždy stejná a jednotně

prezentovaná [14]. BGAPI rovněž poskytuje rozhraní pro různé programovací jazyky, jmenovitě C++ a v případě platformy .NET Framework na operačním systému Windows je dále možné využít jazyka C# nebo VB.NET. BGAPI obsahuje 5 základních tříd jak definuje GenICam - System, Interface, Device, Data Stream a Buffer.

6.2.1 System

Tato třída představuje abstrakci Producenta ve vzoru Producent - Konzument, jež je využit pro realizaci komunikace kamery a připojeného systému. Implementuje jednak metody pro otevření a uzavření komunikace na straně Producenta a rovněž metody pro zjišťování jeho stavu, modelového označení, ID zařízení, výrobce aj.

6.2.2 Interface

Modul Interface reprezentuje konkrétní hardwarové rozhraní jakým je např. síťová karta počítače v případě Ethernetového rozhraní nebo frame grabber pro Camera Link aj. Hlavní úlohou této části je zpřístupnění dostupných zařízení a jejich instance.

6.2.3 Device

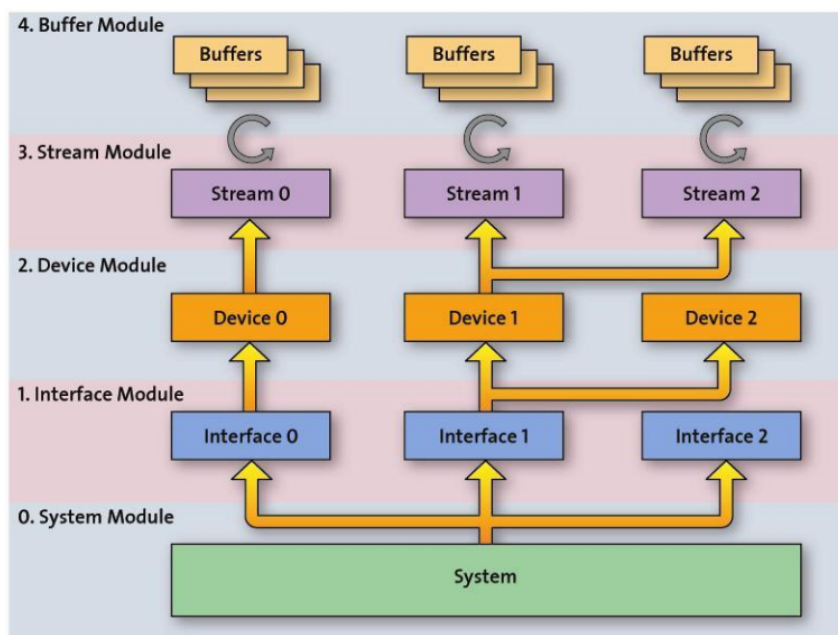
Modul Device představuje prostředníka vždy pro jedno konkrétní fyzické zařízení. Úlohou modulu Device je umožnit komunikaci se vzdáleným zařízením a rovněž instanciaci a enumeraci Data Stream modulů. Jeden modul Interface může obsahovat 0 až n instancí modulů Device, není zde přitom žádné softwarové omezení počtu připojených zařízení - toto závisí pouze na použitém hardwaru.

6.2.4 Data Stream

Modul Data Stream představuje fyzický proud dat ze zařízení a obstarává správu bufferů.

6.2.5 Buffer

Tato část realizuje komunikaci dat s pamětí. Obsahuje informace o přijatých datech jako velikost obrazu, ID vyjadřující jeho pořadí, formát pixelů a další.



Obr. 6.2: Hierarchie transportní vrstvy podle standartu GenICam. [15]

6.2.6 Baumer Filter Driver

Poslední důležitou součástí BGAPI, při použití kamer s ethernetovým rozhraním je tzv. filter driver. Operační systém samozřejmě obsahuje ovladače pro síťové prvky, které lze použít, nicméně tyto nejsou z principu jejich běžného využití optimalizované pro specifické požadavky při přenášení velkého množství obrazových dat. Důsledkem toho je zejména nadměrné využívání procesoru počítače a z toho plynoucí menší výkonová rezerva potřebná pro samotné zpracování obrazu, běh ostatních programů a operačního systému. Výrobci kamer proto často nabízejí vlastní optimalizovaný ovladač pro síťovou kartu počítače, tzv. filter driver, který tento problém do jisté míry řeší. Tento ovladač běží na úrovni jádra operačního systému, což mu k síťovým datům zajišťuje přístup s nejvyšší prioritou. Rovněž znovu sestavení obrazových dat probíhá již na úrovni ovladače, což má kromě nižšího využití CPU také vliv na celkovou spolehlivost přenosu, díky již zmiňované vysoké prioritě. I tak ale zůstává zatěžování procesoru jedním z hlavních neduhů ethernetového rozhraní, což v důsledku klade vyšší nároky na pořizovaný hardware.

6.3 Popis hlavního programu

6.3.1 Požadované vlastnosti

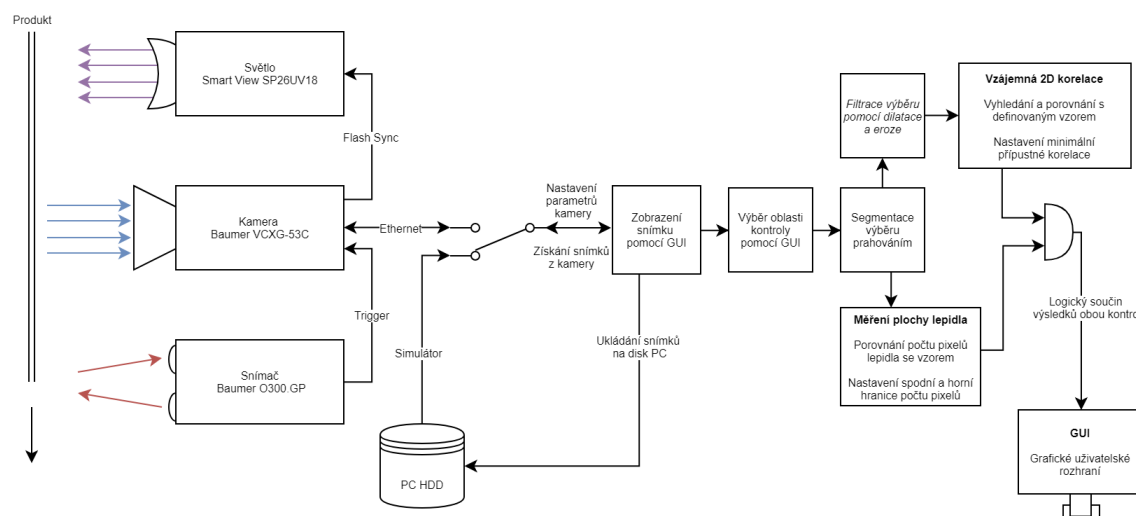
Než se pustíme do popisu výsledného programu, shrňme jaké funkce by měl obsahovat. Uživatel - obsluha linky - musí být schopen sledovat obraz z kamery snímající každý procházející pytel. Dále musí mít možnost definovat správnou podobu (tvar a plochu) naneseného lepidla, pokud možno jednoduchým a rychlým způsobem. Systém dále musí uživateli zobrazovat aktuální míru shody vzoru se současným stavem a umožnit mu nastavit přípustné meze odchylek měřených veličin. Na základě výsledků dílčích kontrol se uživateli zobrazí celkový výsledek kontroly, na který může reagovat a který může být v podobě signálu rovněž zaveden do nadřazeného řídicího systému pro zpracování. V rámci testovací fáze projektu bude program pouze zobrazovat výsledek, případně ukládat snímky z kamery na disk.

6.3.2 Funkce zpracování obrazu - OpenCV, EmguCV

V rámci návrhu řešení byly metody zpracování obrazu testovány v prostředí MATLAB, s rozšířením Image Processing Toolbox. Pokud však chceme tyto metody použít při vývoji aplikace v jiném programovacím jazyce, zpravidla využijeme knihovnu zvanou OpenCV. Jedná se o open-source knihovnu pro účely počítačového vidění a strojového učení. OpenCV knihovna byla vytvořena aby poskytla společnou infrastrukturu pro aplikace počítačového vidění a zefektivnila využití těchto aplikací v komerčním prostředí. Knihovna obsahuje více než 2500 optimalizovaných algoritmů zpracování obrazu a je podpořena komunitou čítající přes 47 000 vývojářů, kteří OpenCV neustále vyvíjejí.

Jelikož je knihovna OpenCV nativně k dispozici pro jazyky C++, Python, Java a MATLAB, je případě programovacího jazyka C#, stejně jako v případě dalších jazyků využívajících platformu .NET, potřeba využít alternativu v podobě wrapperu Emgu CV. Ten poskytuje možnost volat přímo z prostředí jazyka C# a dalších, funkce obsažené v knihovně OpenCV.[20][21]

6.3.3 Blokové schéma kontrolního procesu



Obr. 6.3: Blokový diagram programu a procesu získání snímku. Funkce filtrací zvýrazněné kurzívou jsou volitelné.

Na diagramu 6.3 můžeme vidět celkový průběh procesu kontroly a zpracování snímku v rámci programu. V diagramu jsou pro zachování přehlednosti zakresleny pouze vybrané důležité signály, není zde tak např. uvedeno napájení světla, kamery a snímače, jež je pro všechny komponenty shodné a to 24 V DC. Rovněž nejsou zmíněny konkrétní použité síťové prvky a HW specifikace PC, které nebyly v rámci testovací fáze projektu prozatím vybrány.

V levé části diagramu je znázorněn pohybující se produkt, jehož hrana je nejprve zachycena za pomoci optického triangulačního snímače Baumer O300.GP, fungujícím na principu potlačeného pozadí. Tento snímač lze v jeho „učícím“ režimu adaptovat tak, aby detekoval přítomnost objektu jen v určité vzdálenosti od něj a vzdálenější předměty považoval za objekty pozadí. Namíříme-li tedy snímač proti vhodnému místu, kde při průchodu produktu dojde k překrytí dostatečně hluboké mezery, je možné provést adaptaci na vzdálenost, ve které se produkt od snímače nachází a jeho průchod pak bude spolehlivě detekován. Vzdálenost snímače od produktu musí být dle specifikací maximálně 200 mm, ideálně však okolo 80 mm. V této vzdálenosti se nachází ohnisko optiky zdrojové diody a snímač zde tak dosahuje nejužšího paprsku. Výstup snímače pracuje s tzv. Push-pull logikou, která umožňuje připojit výstup libovolným způsobem, tedy buď jako High Active (logickou 1 představuje napětová úroveň 24 V, log.0 napětová úroveň 0 V) nebo jako Low Active (logickou 1 představuje napětová úroveň 0 V, log.0 napětová úroveň 24 V). Výstupu snímače, přesněji pak jeho náběžná hrana, slouží jako signál pro zaznamenání snímku a je tedy přiveden jako vstup Line0 do kamery. [19]



Obr. 6.4: Optický triangulační snímač Baumer O300.GP.[19]

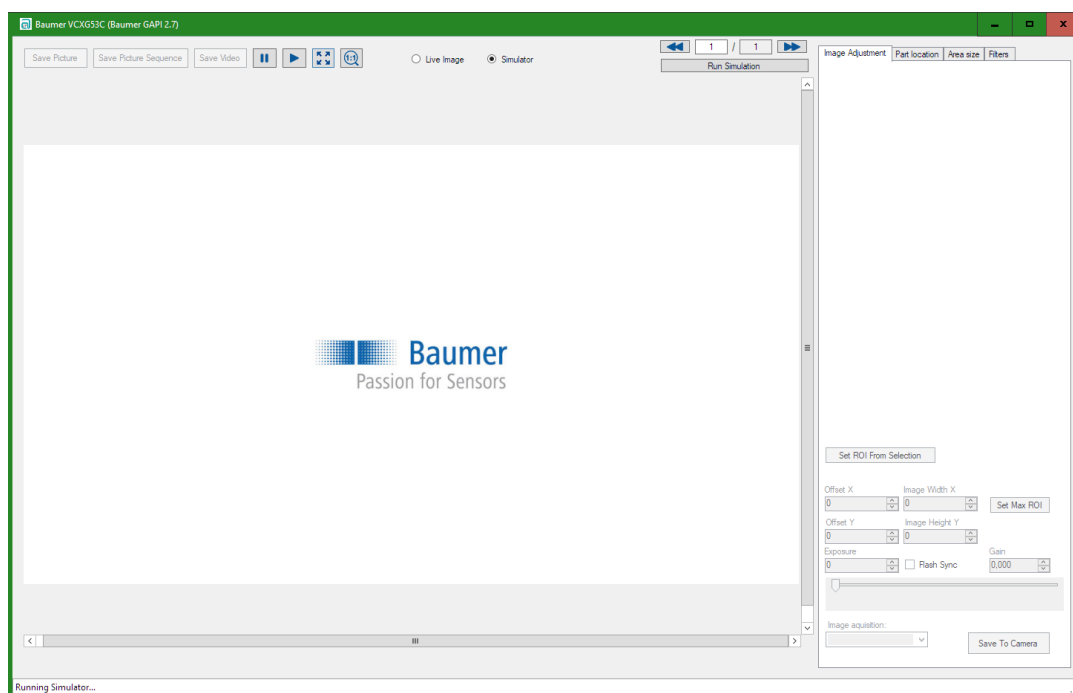
V případě, že je v kontrolním programu v záložce *Image Adjustment* nastaven parametr *Image Acquisition* na volbu *External trigger*, je v kameře nastaven parametr *Trigger Mode* na hodnotu "On" a v parametru *Trigger Source* nastaven vstup "Line0". Nyní kamera čeká na náběžnou hranu signálu na vstupu *Line0* a při detekování tohoto signálu zaznamená snímek s expoziční dobou zvolenou pomocí hodnoty v poli *Exposure*, opět v záložce *Image Adjustment*.

Při zahájení expozice a po dobu jejího trvání je rovněž aktivován výstup kamery *Line3* (v High Active režimu), který je připojen jako vstup světla a slouží pro jeho synchronizaci s kamerou. Díky tomu je zajištěna aktivace světla jen na nezbytně nutnou dobu, což vede k prodloužení jeho životnosti a menšímu tepelnému zatěžování. Zdrojem pro tento výstup je událost *Exposure Active* vyvolaná přímo zařízením, která je dle specifikací výrobce aktivována za dobu nanejvýš $3 \mu s$ od zahájení expozice. Synchronizaci s externím osvětlením je rovněž možné manuálně vypnout zrušením zatržení políčka *Flash Sync* v záložce *Image Adjustment*.

Po zachycení snímku dochází k jeho přenesení do počítače. Kamera VCXG-53C využívá komunikačního standardu GiGE Vision, jde tedy o přenos prostřednictvím gigabitového ethernetu. Tento standard vychází z běžného IP protokolu, k připojení je tedy možné využít běžnou síťovou infrastrukturu. Pro dosažení vyšší propustnosti a nižší latence využívá GiGE Vision na transportní vrstvě protokolu UDP, který je však méně spolehlivý, jelikož na rozdíl od TCP protokolu neposkytuje žádné záruky doručení dat. O kontrolu dat se tak starají až protokoly GVCP a GVSP na úrovni aplikační vrstvy komunikačního modelu.

Data přenesená do počítače je dále potřeba konvertovat pro vytvoření bitmapového obrazu. O tento úkol se stará třída *ImageConverter*, která již byla součástí příkladového programu *Baumer ShowMeProcess* a díky ní tak dostáváme přímo objekt typu *Bitmap*, který je možné jednoduše zobrazit, provádět nad ním potřebné zpracování, případně ho dále převádět. Aktuální obraz z kamery je vždy zobrazován uživateli v hlavním okně programu. Pokud kamera není připojena po spuštění programu, je uživatel na tuto skutečnost upozorněn dialogovým oknem.

Pokud kamera není momentálně k dispozici, nebo chceme program využít k zobrazení již uložených snímků, je možné jej přepnout do režimu simulátoru pomocí přepínacího tlačítka v horní části obrazovky. Výběr zdroje obrazu je tímto přesměrován na disk PC, jak znázorňuje symbol přepínače na diagramu 6.3. V tomto režimu je možné sekvenčně procházet snímky ve zvoleném adresáři¹ a aplikovat na ně stejné kontroly jako ve stavu s aktivní kamerou. Je tak možné pomocí programu a kamery nejprve zaznamenat velké množství snímků a na nich poté provést nastavení parametrů kontrol a otestovat toto nastavení zcela bez zasahování do výrobního procesu.



Obr. 6.5: Hlavní okno programu.[16]

6.3.4 Nastavení parametrů kamery

Po úspěšném připojení ke kameře dojde k načtení výchozího uživatelského nastavení a je tak možné upravit celou řadu parametrů. Veškeré nastavení lze provést na jediném místě, v záložce *Image Adjustment*, v její spodní části. V tuto chvíli kamera zobrazuje živý obraz v kontinuálním režimu snímání maximální možnou snímkovací rychlostí, bez ohledu na trigger signál ze snímače. Toto nastavení lze změnit volbou parametru *External trigger* z rozevírací nabídky *Image acquisition*. Nad touto nabídkou se dále nachází posuvný ovladač pro volbu doby expozice. Ten je zároveň spojen s číselným polem *Exposure*. Změna hodnoty kteréhokoliv z těchto dvou

¹ Adresář může obsahovat i jiné soubory než snímky z kamery, automaticky jsou filtrovány pouze soubory s příponou bmp.

ovládacích prvků vyvolá automaticky změnu druhého. V pravé části je pak možné nastavit nezávisle hodnotu zesílení snímače. Rozsahy všech těchto ovládacích prvků se automaticky nastavují podle právě připojené kamery, nehrozí tak možnost nastavení neplatných hodnot. Mezi popsányými ovládacími prvky se nachází již dříve zmiňované zatrhávací pole, sloužící pro aktivaci synchronizace expozice kamery s osvětlením.

Nad popsányými ovládacími prvky se nachází čtveřice číselných polí sloužících k nastavení rozměrů oblasti zájmu, tzv. ROI. Pro jednodušší a intuitivnější výběr však slouží dvojice tlačítek *Set Max ROI* a *Set ROI From Selection*. První zmíněné tlačítko nastaví maximální možné rozlišení kamery dané použitým snímačem a zobrazí aktuální obraz v hlavním okně. Po stisku druhého tlačítka okno s obrazem mírně zešedne a je očekáván vstup od uživatele v podobě výběru oblasti zájmu, pomocí stisku levého tlačítka myši a tažení. Po puštění tlačítka je rovnou nastavena zvolená oblast jako aktuální ROI a v souladu s tím jsou také nastaveny všechny čtyři odpovídající číselné pole.

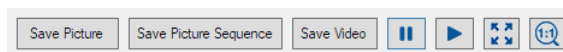
Posledním ovládacím prvkem, nacházejícím se v této části je tlačítko *Save To Camera*, které slouží k uložení aktuálního nastavení (expoziční doby, zesílení, ROI a dalších) do jednoho z uživatelských programů ve flash paměti kamery. Po restartu kamery je tak veškeré nastavení automaticky obnoveno.

Obr. 6.6: Nastavení parametrů kamery na záložce *Image Adjustment*.²

6.3.5 Podpůrné ovládací a informační prvky

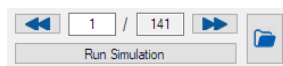
V levé horní části hlavního okna programu nalezneme řadu ovládacích prvků pro jednotlivé i vícenásobné ukládání snímků z kamery na disk počítače, dále tlačítko pro zaznamenání video sekvence, tlačítka pro zastavení a spuštění kamery a rovněž tlačítka pro změnu velikosti náhledu obrazu.

² Nastavení v záložce *Image Adjustment* je možné měnit pouze s připojenou kamerou, v režimu simulátoru jsou proto zašedlá.



Obr. 6.7: Ovládací prvky změny zobrazení, uložení snímku, sekvence snímků nebo videa.

V pravé horní části se nacházejí ovládací prvky simulačního módu, které umožňují procházet vybraným adresářem s uloženými snímky v manuálním i automatickém režimu. Pro potřeby manuálního procházení slouží tlačítka šipek, pro automatické pak tlačítko *Run Simulation*, které výsledky aplikovaných kontrol ukládá do textového souboru ve zvoleném adresáři. Volba daného adresáře je vyvolána po stisku tohoto tlačítka, před započítím automatického procházení. Mezi tlačítka šipek se dále nacházejí dvě textová pole informující o pořadí aktuálního snímku a celkovém počtu snímků v adresáři. Posledním ovládacím prvkem v této části je tlačítko pro opětovné vyvolání nabídky výběru adresáře se snímky, nacházející se vpravo.



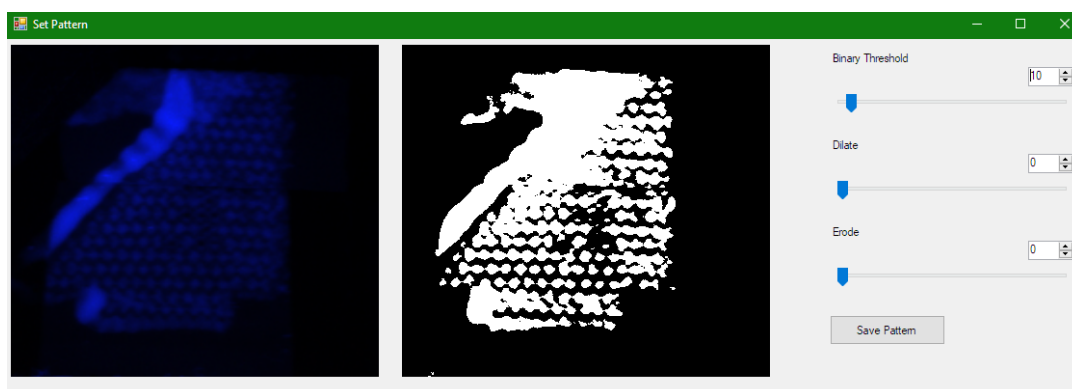
Obr. 6.8: Ovládací a informační prvky simulátoru.

6.3.6 Part location - funkce pro vyhledání vzoru

Po nastavení parametrů kamery, případně aktivaci simulačního režimu a volbě adresáře se snímky je možné přistoupit k nastavování funkcí pro samotnou kontrolu. První z nich je vyhledání vzoru lepidla v obraze a porovnání shody. Tato funkce se v prostředí programu nazývá *Part Location* a její nastavení provedeme ve dvou krocích. Nejprve je potřeba definovat vzor lepidla pomocí tlačítka *Set Pattern*, nacházejícího se na záložce *Part Location*. Stiskem tohoto tlačítka dojde k vyvolání obdélníkového výběru shodného typu jako v případě nastavení ROI z předchozích kroků. Systém opět očekává uživatelský výběr levým tlačítkem myši, po jehož provedení je vyvoláno nové okno s dvěma dílčími zobrazeními a nastavovacím panelem v pravé části. Na levém obrázku se nyní nachází výřez vzniklý provedeným výběrem, na pravém pak náhled zobrazuje ten samý výřez, avšak s binárním obrazem dle nastaveného prahu. Rovněž se zde nacházejí dva posuvné ovládací prvky pro nastavení počtu iterací volitelných morfologických funkcí dilatace a eroze, sloužících k filtraci binárního snímku.

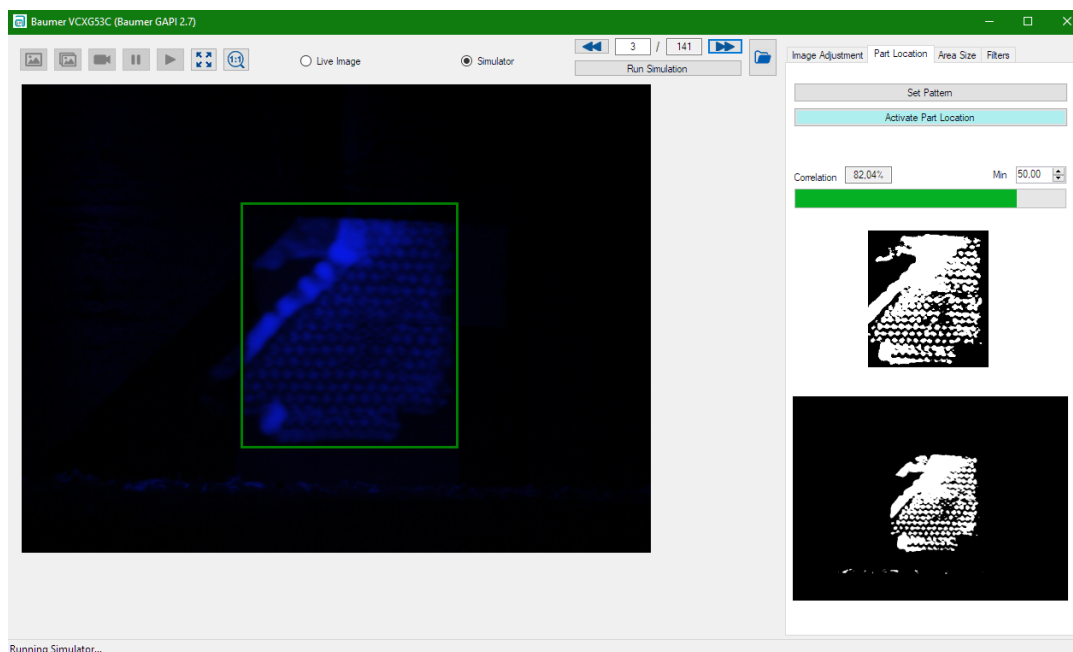
Použitím obou zmíněných morfologických operací v uvedeném pořadí lze dosáhnout nejprve zaplnění nerovností kontur obrazce a následné odebrání přebývajících bodů. Je-li dodrženo dané pořadí filtrace a zároveň počet iterací obou filtrů je nastaven stejně, dojde k vyhlazení hran obrazce a současně zůstane zachován jeho

původní rozměr. Pro dokončení úprav šablony použijeme tlačítko *Save Pattern*, kterým dojde k zavření okna a uložení aktuální podoby binární šablony do globálně přístupné proměnné.



Obr. 6.9: Okno pro nastavení výchozího vzoru lepidla pro následné srovnání korelací.

Nyní zbývá už jen aktivovat funkci pomocí tlačítka *Activate Part Location*, čímž dojde k vyhledání naučeného vzoru v obraze. Pokud je míra shody vyšší než hodnota nastavená v číselném poli *Min* v pravé části, dojde k zvýraznění nalezeného vzoru v hlavním okně s původním obrazem, pomocí zeleného obdélníku o velikosti naučené šablony. Zároveň je pomocí textového pole a ukazatele průběhu zobrazena aktuální hodnota výsledku korelační funkce. Uživatel má rovněž možnost ověřit správnost prahovaného vzoru a celého obrazu na náhledech umístěných v pravé části okna, pod ovládacími prvky funkce.



Obr. 6.10: Zobrazení výsledku korelace v hlavním okně programu.

6.3.7 Area size - funkce měření plochy lepidla

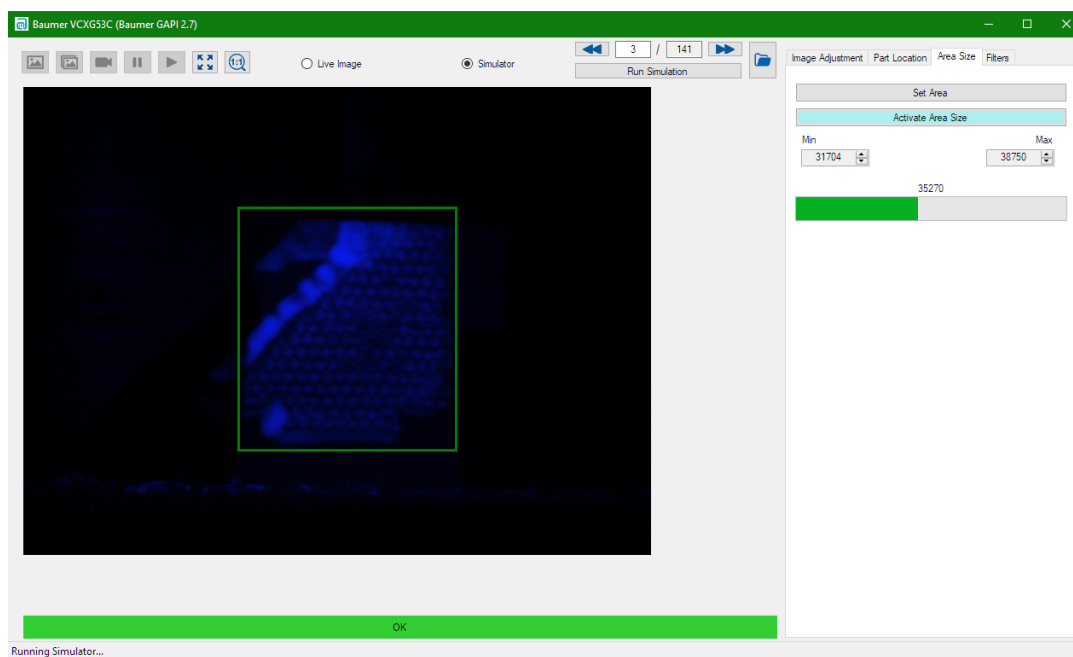
Druhou kontrolní funkcí, která je v současné verzi programu implementována, je funkce pro určení velikosti plochy lepidla na základě počtu světlých pixelů obrazu. Na první pohled se jedná o velice jednoduchou funkci, která se však ukazuje být velice efektivním a spolehlivým nástrojem pro detekci změn povahy kontrolovaného objektu.

Vstupem této funkce je binární snímek, který vznikne po výběru oblasti uživatelem (opět obdobným nástrojem výběru jako v předchozí funkci) a následné segmentaci prostým prahováním, ruční volbou vhodného prahu. Principiálně jde o triviální algoritmus, provádějící prostý součet pixelů s hodnotou 1 a následné porovnání na shodu s předem definovanou hodnotou, respektive intervalem hodnot.

Funkce je přístupná z karty *Area size*, v horní části obrazovky a její nastavení se opět provádí ve dvou krocích. Nejdříve pomocí tlačítka *Set Area* dojde k vyvolání již známého obdélníkového výběru, pomocí kterého lze definovat oblast zájmu, v níž chceme měřit plochu lepidla. Po provedení výběru se otevře okno s nastavením prahu, které opět obsahuje dva náhledy - vlevo výřez původního snímku a vpravo binární segmentovaný snímek, dle aktuálního zvoleného prahu. Po uložení nastavení pomocí tlačítka *Save Area* je možné aktivovat vyhodnocování kontroly tlačítkem *Activate Area Size*.

Při aktivování se v oblasti pod tlačítkem zobrazí ukazatel průběhu a dvě textová pole s hodnotami *Min* a *Max*. Ukazatel průběhu slouží k zobrazení aktuální vy-

počtené hodnoty počtu světlých pixelů, odpovídající ploše lepidla. Hodnoty v polích *Min* a *Max* jsou ve výchozím stavu vypočteny jako 80 respektive 120% výchozí hodnoty počtu pixelů, určené při nastavení prahu segmentace. Pokud se aktuální počet bílých pixelů definované oblasti nachází v intervalu *Min* a *Max*, je výsledek kontroly stanoven jako vyhovující. Při překročení kterékoliv z těchto hodnot je výsledek určen jako nevyhovující.



Obr. 6.11: Zobrazení výsledku výpočtu a porovnání plochy v hlavním okně programu.³

³ V případě, že jsou aktivovány obě kontroly, je ve spodní části okna zobrazován také celkový výsledek jako jejich logický součin.

7 TESTOVÁNÍ U ZÁKAZNÍKA

Po úspěšném zprovoznění programu bylo možné přistoupit k otestování celého systému u zákazníka. V době tohoto testování nebyl k dispozici krycí rám pro kameru a osvětlení, ani příslušný počítač, který bude sloužit obsluze linky k monitorování. Bylo tak potřeba zvolit improvizované řešení. Kamera byla umístěna volně na stativu, postavený ve vhodné vzdálenosti od linky, osvětlení a snímač byly provizorně uchyceny pomocí kloubových držáků ke konstrukci linky. Zapojení komponent bylo zachováno, jak je znázorněno na blokovém schématu kontrolního procesu na obrázku 6.3. Obraz z kamery byl zobrazen a zpracován pomocí notebooku Lenovo L540 s procesorem Intel Core i5-4200M 2,5GHz, 12 GB operační paměti a síťovou kartou Intel Ethernet Connection I217-V s podporou rozhraní 1000Base-T.

Testování probíhalo při plné produkci, bez možnosti jakkoliv do jejího průběhu zasahovat. Bylo tedy např. poměrně komplikované správně nastavit snímač pro spouštění kamery, jelikož pro naučení snímače k detekci produktu v určité vzdálenosti je vyžadováno, aby se produkt v této vzdálenosti nacházel bez přerušení několik sekund. Další komplikací pak byly naopak prostoje při výměnách šablon pro nanášení lepidla a přestavování linky na jinou velikost produktu. Při těchto provozních úpravách může být linka i více než hodinu odstavená. Vzhledem k těmto skutečnostem nebylo možné za dobu testování zachytit kritické vady procesu, které by pomohly stanovit závěr, vypovídající o úspěšnosti kontroly. V rámci testování bylo zaznamenáno celkem téměř než 2500 snímků různých vzorů nanášeného lepidla. Pro minimalizování vlivu pohybového rozostření byla u některých sérií snímků nastavena poměrně krátká doba expozice (okolo 200 μ s). Vlivem takto krátké expoziční doby se může zdát, že jsou některé snímky podexponované, avšak následným prahováním lze snadno ukázat, že potřebná informace je ve snímku stále obsažena.

7.1 Podmínky testování

Testování probíhalo přes den v uzavřené hale s částečně prosklenou střechou. Zdrojem okolního světla tak bylo jednak denní světlo a dále pak pravidelně rozmístěné umělé zdroje, především zářivky. UV bodové světlo bylo umístěno ve vzdálenosti zhruba 20 cm od produktu. Kryt proti vstupu okolního světla nebyl použit.

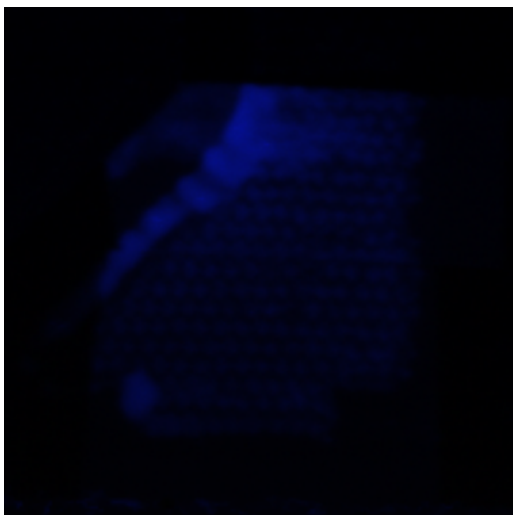
Doba expozice byla pro všechna měření nastavena na hodnotu 200 μ s, v průběhu posledních dvou měření také na 400 μ s. Celkem bylo vytvořeno 5 skupin měření o různých počtech snímků (z důvodu proměnlivého chodu samotné linky). Kamera byla vždy umístěna tak, aby zabírala patřičnou plochu a pro snížení objemu přenášených dat bylo, až na jeden případ, vždy omezeno ROI kamery.

Pro lepší představu o rozložení naměřených hodnot bylo zvoleno pro obě kontrolní funkce zobrazení dat pomocí histogramu. Předpokládané statistické rozložení dat je dle povahy tohoto procesu normální (Gaussovo) rozdělení.

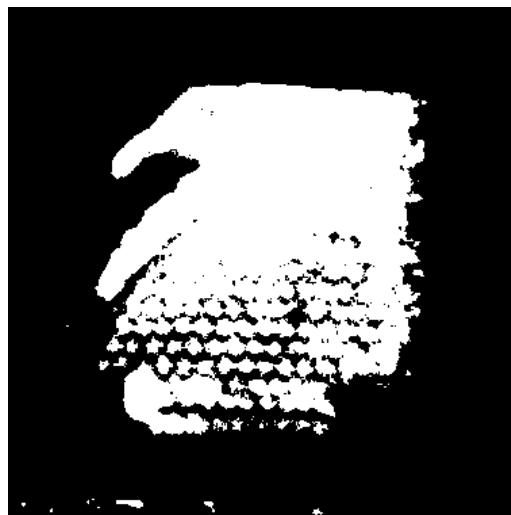
7.2 Datový set 1 - 4

Na snímcích z těchto měření je zachycen vždy stejný vzor z průběhu chodu linky vyrábějící papírový pytel o šíři dna 350 mm. Je zde viditelný vzor čtvercového tvaru se zkosenou hranou v jeho levé části. Tento vzor je použit pro horní část dna pytle, která se při následném skládání přehýbá jako první a je následně překryta spodní částí dna. Způsob skládání dna je blíže ukázán na obrázku 4.3, v kapitole 4.1.1. V závěru měření datového setu 1 se vyskytla chyba v nanášení lepidla, která je patrná na segmentovaném snímku 7.2b. K chybě došlo po zastavení linky a zásahu obsluhy do části s nanášecím vzorem. Po opětovném spuštění pak u několika kusů produktu došlo k nedostatečnému pokrytí šablony lepidlem a vzniku vady. Tato vada se v různé míře projevila na zhruba 25 posledních snímcích, přičemž v některých případech nebylo lepidlo nanášeno téměř vůbec. V případě spouštění linky je však vždy několik prvních kusů automaticky vyřazováno, než se výrobní proces ustálí. Tyto vadné kusy by tak měly být za tohoto předpokladu vyřazeny, nehledě na výsledek kontroly.

Podle předpokladu se ukázalo, že v případě tohoto druhu chyby dobře funguje kontrola pomocí měření plochy lepidla (funkce Area Size), která u vybrané vady na obrázku 7.2a detekuje skoro 50% úbytek počtu světlých pixelů, patřících lepidlu (konkrétně 22540 px oproti 44701 px v naučeném vzoru). Vzájemná korelace v tomto konkrétním případě stále úspěšně vrací shodu s původní šablonou ve výši skoro 65%. Pohledem do histogramu korelací lze snadno určit, že se již jedná o výrazně nižší shodu než jakou vykazují výsledky snímků bez těchto vad.

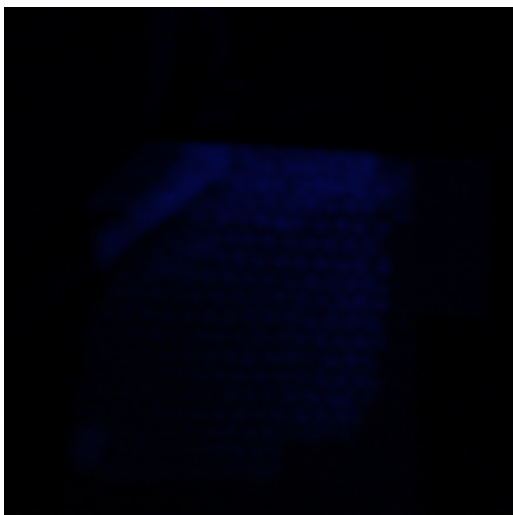


(a) Naučený vzor.

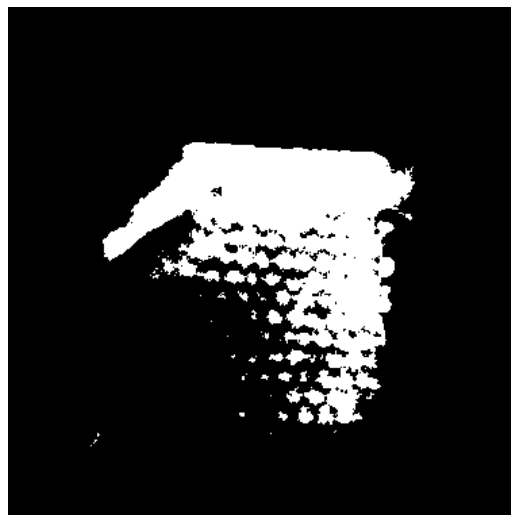


(b) Segmentovaný obraz vzoru.

Obr. 7.1: Obraz šablony a jeho prahovaná podoba.

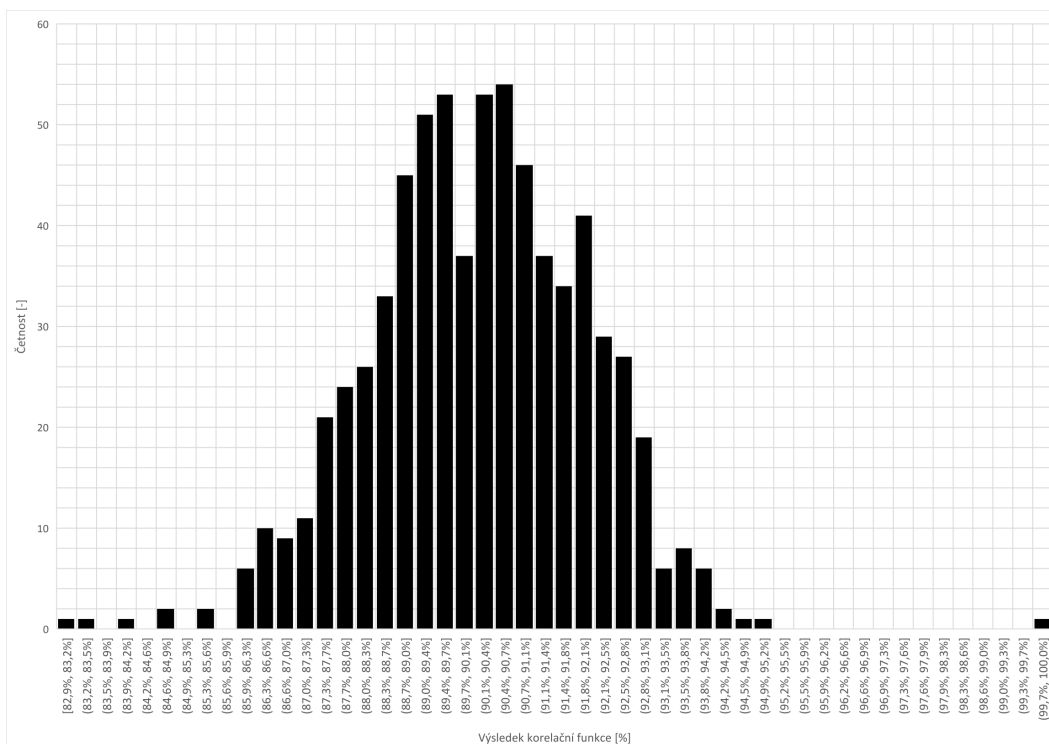


(a) Zachycená chyba.

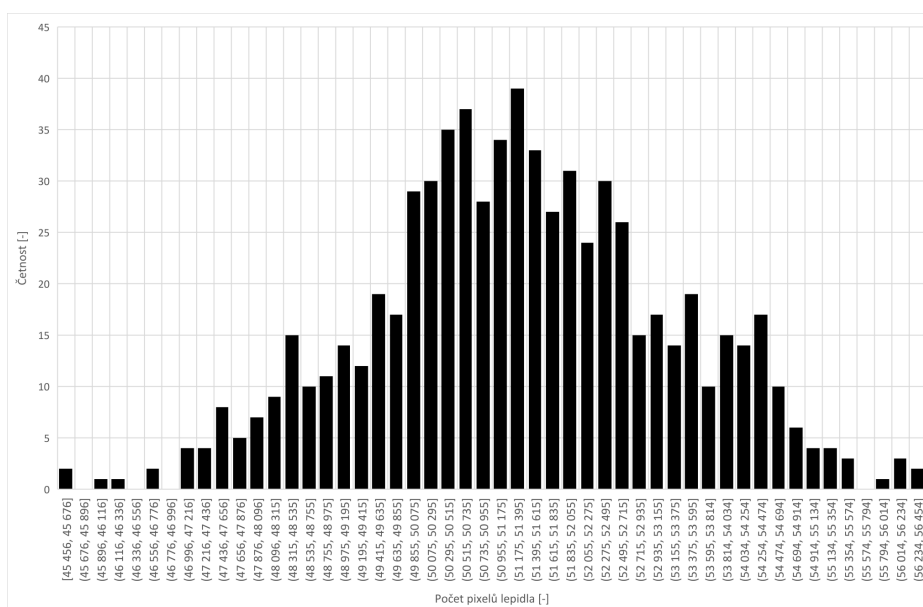


(b) Segmentovaný obraz chyby.

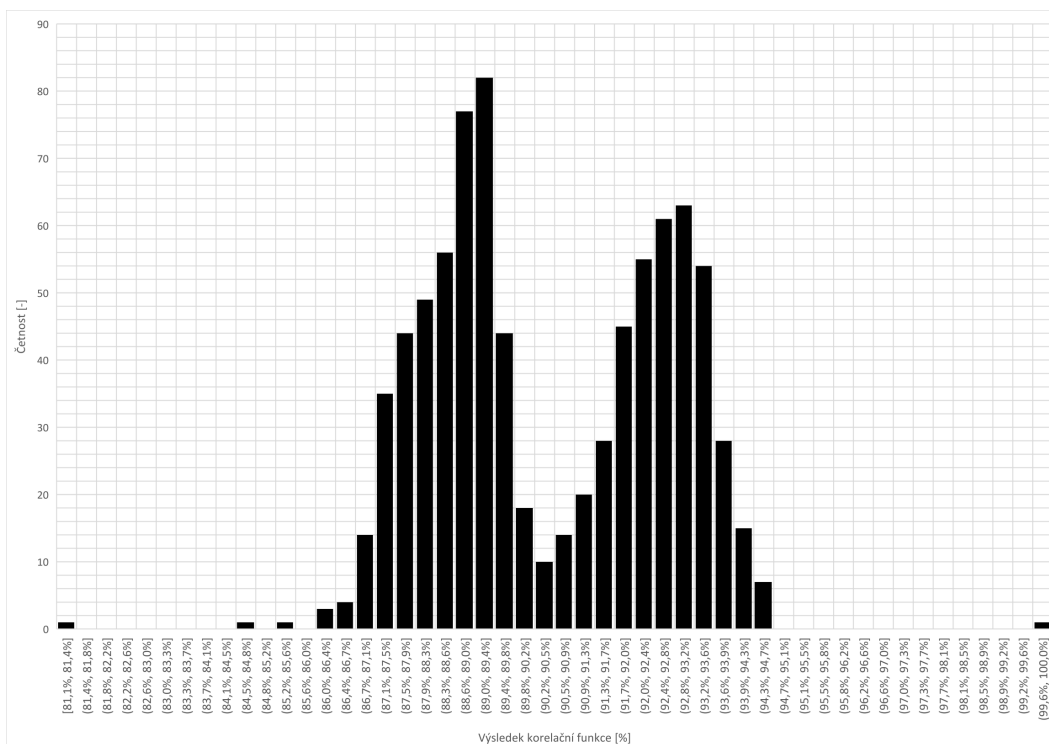
Obr. 7.2: Chybový snímek vzniklý vlivem zásahu obsluhy do výrobního procesu.



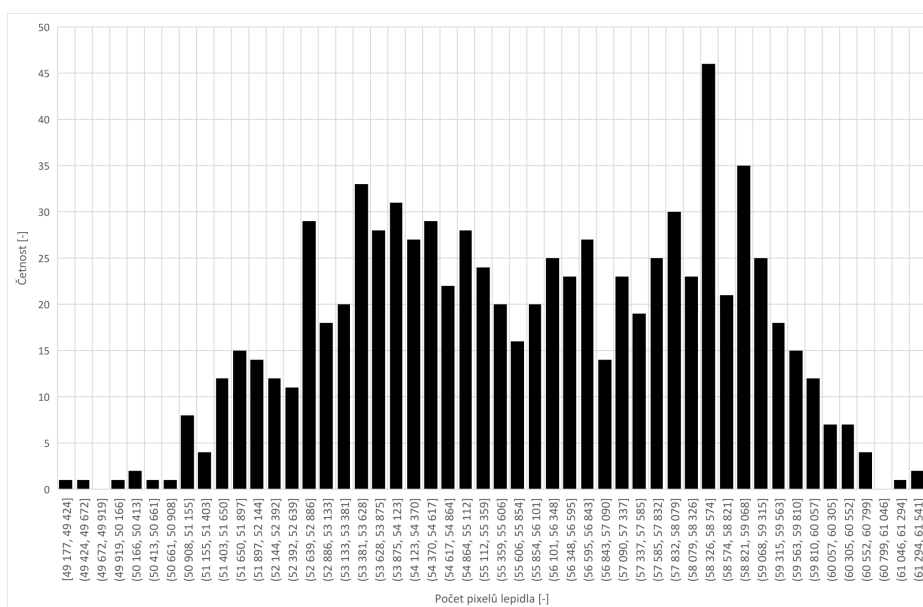
Obr. 7.3: Vzájemná korelace šablony a obrazu v rámci testovacího setu 2 - histogram



Obr. 7.4: Plocha pixelů lepidla v rámci testovacího setu 2 - histogram



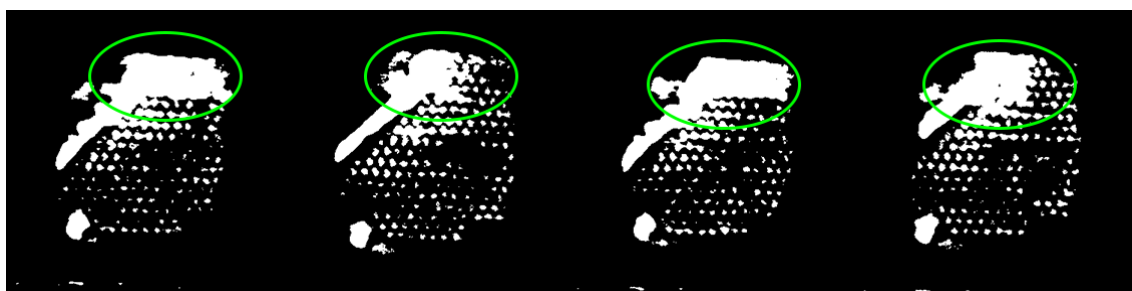
Obr. 7.5: Vzájemná korelace šablony a obrazu v rámci testovacího setu 3 - histogram



Obr. 7.6: Plocha pixelů lepidla v rámci testovacího setu 3 - histogram

Vzhledem k celkovému počtu datových setů jsou v textu této práce uvedeny jen histogramy datových setů 2 a 3, jakožto dvou nejpočetnějších skupin měření. Výsledky ostatních datových setů jsou pak k nalezení v elektronických přílohách.

Z histogramů je zjevné, že se dle předpokladů jedná ve všech případech o Gaussovo rozdělení. Zajímavé výsledky lze pozorovat na datech z datového setu 3, obzvláště pak na histogramu vzájemné korelace^{7.5}. Na grafu jsou viditelné dvě částečně se překrývající Gaussovy křivky, které mají zároveň velmi podobný tvar a hodnoty četností. To naznačuje, že data mohou obsahovat dva lišící se shluky, u kterých se může v čase nějakým způsobem měnit např. tvar vzoru. Tento předpoklad lze potvrdit pozorným prozkoumáním samotných snímků. Pokud se podíváme na několik po sobě jdoucích obrazů, je možné si všimnout pravidelně se opakujícího nedostatku lepidla v horní části vzoru. To je pravděpodobně způsobeno nedokonalostí samotné linky, např. nerovnoměrnou distribucí lepidla na nanášecí válec. Na obrázku 7.7 jsou čtyři po sobě jdoucí binární snímky segmentované shodným prahem, které byly rovněž zachyceny kamerou v tomto pořadí. Zeleně zakroužkovány jsou místa, kde dochází k popisovanému úbytku - na 1. a 3. snímku zleva je v horní části výrazně delší pruh lepidla, než na zbylých dvou snímcích.



Obr. 7.7: Pravidelné opakování úbytku lepidla v horní části vzoru - Datový set 3

7.3 Datový set - Atypická linka

Tento datový set obsahuje snímky z linky vyrábějící pytle větších rozměrů se dny o šíři až 650 mm. Konstrukčně se však příliš neliší - alespoň ne ve způsobu nanášení lepidla - od předchozích linek pro menší produkty. Vzor nanášeného lepidla je rovněž podobný předchozím, jen je úměrně větší pro dosažení potřebné délky spoje. Výsledné histogramy se svou podobou blíží již prezentovaným v datových setech 1 - 4, jsou proto společně se všemi zaznamenanými snímky součástí elektronické přílohy této práce.

7.4 Zhodnocení výsledků testování

Pro snazší orientaci ve výsledcích a možnost jejich správné interpretace byla vytvořena tabulka obsahující údaje z běhu kontrolních funkcí nad jednotlivými datovými sety a tyto hodnoty byly dále doplněny o výpočty vážených průměrů. Z každého datového setu byly nejprve zjištěny minimální a maximální hodnoty plochy lepidla a minimální hodnota vzájemné korelace. Dále byly pro funkci měření plochy lepidla na základě těchto hodnot vypočteny maximální procentuální odchylky od výchozí hodnoty, kterou program určil ze vzorového snímku. Jelikož větší množství dat je pro přesnější statistické výpočty obecně výhodnější, byly vypočteny váhy pro jednotlivé datové sety na základě celkového počtu snímků v každém setu. Výpočet váhy každého setu byl vztažen vždy k nejpočetnějšímu setu - č. 3, který tím pádem obdržel váhu 1.

		Plocha lepidla					Vzájemná korelace	Váha
Název datové řady	Snímků	MIN	% z výchozí h.	MAX	% z výchozí h.	Výchozí hodnota	MIN	
DataSet1OK	297	36020	80,58%	49037	109,70%	44700	81,12%	0,357831
DataSet2	698	45456	90,39%	56454	112,27%	50286	82,85%	0,840964
DataSet3	830	49177	91,92%	61541	115,03%	53498	81,06%	1
DataSet4HE	140	42988	89,30%	52913	109,92%	48137	80,78%	0,168675
DataSet4LE	183	41592	82,95%	53378	106,45%	50144	79,02%	0,220482
LinkaAtypLE	62	90437	94,59%	117610	123,01%	95608	87,86%	0,074699
LinkaAtypHE	284	93651	78,30%	132453	110,74%	119612	88,38%	0,342169
Vážený průměr			87,85%		112,42%		82,41%	

Obr. 7.8: Tabulka shrnující údaje z jednotlivých měření.

Díky datovému setu 1 obsahujícímu také snímky s přítomnými vadami bylo prokázáno, že systém je schopen úspěšně detekovat nedostatek naneseného lepidla, pokud je minimální přípustná míra korelace nastavena na hodnotu okolo 80% a zároveň interval přípustných hodnot počtu světlých pixelů je v rozmezí 80 až 120% výchozí hodnoty. Pro přesnější stanovení těchto mezí je však nutné provést rozsáhlejší testy, ve kterých budou zaznamenány snímky v delším časovém horizontu.

8 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byl na základě provedeného průzkumu používaných metod lepení a možností kamerové kontroly UV lepidla naneseného na papírovém pytli, navržen a otestován kontrolní kamerový systém, který dokáže úspěšně rozpoznat základní definované vady v nanášení lepidla.

V úvodu práce byla provedena důkladná rešerše po stránce používaných metod lepení, fyzikálních vlastností lepidel na papír a také zde byl vysvětlen princip luminescence UV složky obsažené v lepidle. Na základě rešerše a zadání ze strany zákazníka bylo vybráno odpovídající HW vybavení v podobě kamery Baumer VCXG-53C a průmyslového bodového světla SmartView SP-26UV18. Za pomoci těchto prostředků a spektrometru Oceanoptics USB 4000 byly provedeny prvotní laboratorní testy, kde byly určeny excitační a emisní spektra vzorku zákaznického UV lepidla. Na základě těchto testů byl vybrán vhodný optický filtr typu pásmová propust.

Dále byl detailněji popsán prostor zamýšleného kontrolního pracoviště a byl navržen 3D model sestávající z dílčích modelů kamery, světla a stínícího krytu. Rovněž zde byly vypočteny parametry optické soustavy a byl vybrán adekvátní objektiv s ohniskovou vzdáleností 8 mm.

Následovala fáze návrhu měřících a kontrolních metod, které byly nejprve teoreticky rozebrány a následně otestovány na vzorovém snímku za pomoci prostředí MATLAB. Na základě testů byly vybrány dvě metody posuzování kvality vzoru naneseného lepidla. První metodou byla vzájemná korelace předem definované šablony lepidla a aktuálního obrazu. Tato metoda umožnila nalézt šablonu v obraze a určit míru shody. Druhou metodou kontroly bylo měření plochy naneseného lepidla na základě počtu světlých pixelů v prahovaném obraze. Tato metoda umožnila spolehlivě detekovat úbytek v množství nanášeného lepidla v definované oblasti.

V závěru této kapitoly byly zhodnoceny výsledky testů v MATLABu a detailně rozebrána omezení možností kontrol vyplývající z volby použitých metod.

Po zvolení vhodných metod zpracování obrazu již nic nebránilo tvorbě finálního programu pro optickou kontrolu. Na základě dostupných materiálů v podobě generického API a existujících vzorových příkladů od výrobce Baumer byl pro tvorbu kontrolního SW určen programovací jazyk C#. Postupně byla vytvořena uživatelská aplikace s řadou nadstavbových funkcí pro snazší ovládání a nastavení kontrol. Aplikace byla od počátku vytvářena s důrazem na jednoduchost použití ze strany koncového uživatele a případnou funkční rozšiřitelnost pro budoucí projekty.

Závěrečná kapitola práce se věnuje výsledkům testů systému u zákazníka. V kapitole jsou popsány podmínky, za kterých byly testy vykonány a také jsou zde uvedeny jistá omezení pro možnost rozsáhlejšího testování systému, plynoucí z povahy samotného výrobního procesu. Celkem bylo v průběhu testů zaznamenáno skoro 2500 snímků různých vzorů nanášeného lepidla. Tyto snímky byly rozděleny do jednotlivých datových setů tak, aby platilo, že snímky daného datového setu byly vždy pořízeny za stejných okolních podmínek.

Data z testů byly vyhodnocena pomocí základních statistických metod a na základě těchto výsledků je možné prohlásit, že navržený kontrolní systém splňuje požadavky zákazníka na detekci vybraných definovaných vad v nanášení lepidla. V rámci testů bohužel nebylo možné ověřit správné vyhodnocení všech definovaných vad, jelikož se tyto v krátkém časovém horizontu testování nevyskytly. Je předpokladem, že tyto vady budou blíže zkoumány a vyhodnocovány v průběhu dalších testů.

LITERATURA

- [1] LEAR a.s. *Základy teorie lepení*. [online] [cit. 2017-12-31] Dostupné z URL: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf
- [2] PIZZI, Antoine a Kashmiri L. MITTAL. *Handbook of adhesive technology* 2. dopl.vyd. New York: M. Dekker, 2003. s. 61-75. Kap. 3. ISBN 0-8247-0986-1.
- [3] Lepidla používaná v muzejní praxi a pro konzervování a restaurování. *Informační systém Masarykovy univerzity: Studijní materiály předmětu PŘF:C3800* [online]. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2010/C3800/um/lepidla_predn_2_.pdf
- [4] TESAŘOVÁ, Daniela. *Povrchové úpravy dřeva*. Praha: Grada, 2014. Profi & hobby. ISBN 9788024747156.
- [5] KUNZ, Clemens a Bo LÖNNERDAL. *Human-milk proteins: analysis of casein and casein subunits by anion-exchange chromatography, gel electrophoresis, and specific staining methods*. American Journal of Clinical Nutrition. 1990, 51(1), 37-46.
- [6] Kaseinová lepidla. *Bevedo.cz* [online]. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <https://www.bevedo.cz/napoveda/clanky/kaseinova-lepidla/>
- [7] Glutinová lepidla. *Bevedo.cz* [online]. [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <https://www.bevedo.cz/napoveda/clanky/glutinova-lepidla/>
- [8] DUNCAN, Bruce, Richard MERA, Doug LEATHERDALE, Mark TAYLOR a Russel MUSGROVE. *Techniques for characterising the wetting, coating and spreading of adhesives on surfaces*. NPL Report DEPC-MPR-020. Crown, 2005, (20), 35-38. ISSN 1744-0270.
- [9] TICHOPÁDEK, Petr. *Elipsometrie povrchů a tenkých vrstev - vývoj a aplikace zařízení: Ellipsometry of thin films and surfaces - development and application of apparatus : zkrácená verze Ph.D. Thesis*. [Brno: Vysoké učení technické], c2006. ISBN isbn80-214-3138-5.
- [10] Elipsometry. *Wikipedia*[online]. [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ellipsometry>
- [11] HAYES, Gary R. a Benoite DEVAUD. *Is Luminescence from Quantum Wells Due to Excitons?* Physica status solidi (a). 2002, 190(3), 637–640. DOI:

- 10.1002/1521-396X(200204)190:3<637::AID-PSSA637>3.0.CO;2-7. ISSN 1521-396X.
- [12] Basic photophysics. Photobiological sciences online [online]. 2010 [cit. 2018-01-01]. Dostupné z: <http://photobiology.info/Visser-Rolinski.html>
 - [13] Template Matching. *OpenCV Documentation* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/histograms/template_matching/template_matching.html
 - [14] GenICam - EMVA. *European Machine Vision Association* [online]. 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.emva.org/standards-technology/genicam/>
 - [15] GenICam GenTL standard. *EMVA GenTL Subcommittee*, 2015, 161 s. Dostupné také z: <http://www.emva.org/standards-technology/genicam/genicam-downloads/>
 - [16] *Baumer* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.baumer.com/gb/en/>
 - [17] VCXG-53C. *Baumer* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.baumer.com/gb/en/product-overview/image-processing-identification/industrial-cameras/cxseries/gige-interface/vcxg-53c/p/23826>
 - [18] Bodová světla. *Smart View* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.smartview.cz/sites/default/files/lights/data_sheet/smartview_datasheet_spot_cz.pdf
 - [19] O300.GP. *Baumer* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.baumer.com/gb/en/product-overview/object-detection/light-barriers-and-diffuse-sensors/miniature/o300-gp-gw1b-72n/p/27354>
 - [20] About OpenCV. *OpenCV* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://opencv.org/about.html>
 - [21] EmguCV. *EmguCV: OpenCV in .NET* [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://www.emgu.com/wiki/index.php/Main_Page

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

UV	ultra violet – ultra fialové
VIS	visible spectrum - viditelné spektrum
UAMT	Ústav automatizace a měřicí techniky
VUT	Vysoké učení technické
BP	Bandpass - pásmová propust
FOV	Field of view - zorné pole
ROI	Region of interest - oblast zájmu (výběrem z obrazových bodů snímáče)
fps	Frames per second - počet snímků za sekundu
PoE	Power over Ethernet - označení pro způsob napájení zařízení pomocí Ethernetového rozhraní
SDK	Software development kit - softwarový vývojový balíček
API	Application programming interface - rozhraní pro programování aplikací
BGAPI	Baumer Generic Application programming interface - generické rozhraní pro programování aplikací Baumer
GenICam	Generic Interface for Cameras - generické rozhraní pro průmyslové kamery
EMVA	European machine vision association - Evropská asociace pro strojové vidění
GVCP	GiGE Vision Control Protocol
GVSP	GiGE Vision Streaming Protocol
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol